مباهج الفيزياء الكونية

اختارها وقدم لها

العماد أول مصطفى طلاس

الجزء الثالث

هذا الكتاب

إن عظمة هذا الكون الواسع الخلاب، هي التي جذبت الإنسان إليه، فراح يتأمله وهو لايزال على مدارج وعيه الأولى. وكان تأمله للكون وانجذابه إليه من أسباب تنامي وعيه وتطور تفكيره الفلسفي والعلمي. وعلى الرغم مما حققه الإنسان من تقدم كبير في فهم الكون، فهو لايزال على أبواب مكنونات أسراره، وعلى عتبات بعضها يحاول ولوجها بالتأملات الفلسفية والمنهجية العلمية، بالاستدلال العقلي، والمراصد الفلكية والسفن الفضائية. وكلما نكشف سراً أفضى إلى أسرار، مستمراً في هتك حجبها للاقتراب أكثر من الحقيقة.

إن المسيرة الإنسانية لوعي الكون، والتي بدأت منذ صياغة أول أسطورة حوله وانتهاء بآخر نظرية علمية، لم تصل بعد إلى ذلك اليقين الذي من شأنه أن يطوي دفتي كتاب الكون ويبعث الاطمئنان بصحة معارفنا عنه. وليس غريباً إذ ذاك أننا ونحن نعيش عصر التقدم العلمي العاصف، أن نجد حضوراً وإن كان غير متكافئ بين كل أنماط الوعي الأسطوري والديني والفلسفي والعلمي التي ما انفكت تبحث في أعظم الأسرار وأكثرها مدعاة للقلق ألا وهو سر هذا الكون العجيب.

فرز ألوان : دار أمية - هاتف : ٢٢٢٤٧٦١
طباعة : مطبعة الشامل - هاتف : ٥٤٤٥١٩٥

﴿ وتَرى الجِبالَ تحْسَبُها جامِدةً وهِي تَمُرُّ مرَّ السَّحَابِ صُنْعَ اللهِ الّذي أتْقن كُلَّ شيْءٍ إنَّهُ خَبيرٌ بِما تَفْعَلُون ﴾.[1]

[1] سورة النمل: 88.



دمشق: منطقة المزة(3) ـ حي الجلاء(5) شارع كعب بن مالك
(طلعة الإسكان سابقاً) بناء رقم(2) ـ ص.ب: 16035
هاتف: 6618013 ـ 66180961 تلفاكس:6618820 ـ برقياً: طلاسدار
E-mail:info@dartlass.com Website:www.dartlass.com

مكتبة دار طلاس ـ برج دمشق ـ مقابل وزارة الداخلية ـ هاتف: 2319558

ريع الدار لهيئة مدارس
أبناء وبنات الشهداء في الجمهورية العربية السورية

الآراء الـــواردة في كـتب الـــدار
تعبـــر عـــن فـكـــر مؤلفيهـــا
و لا تعبر بالضرورة عن رأي الـــدار
الطبعـــة الثانيـــة : 2006
رقـــم 7857 تاريـــخ. 13/10/2004
رقـــم الإصـــــدار · 922

اختارها وقدم لها:

العماد أول
مصطفى طلاس

مباهج الفيزياء الكونية

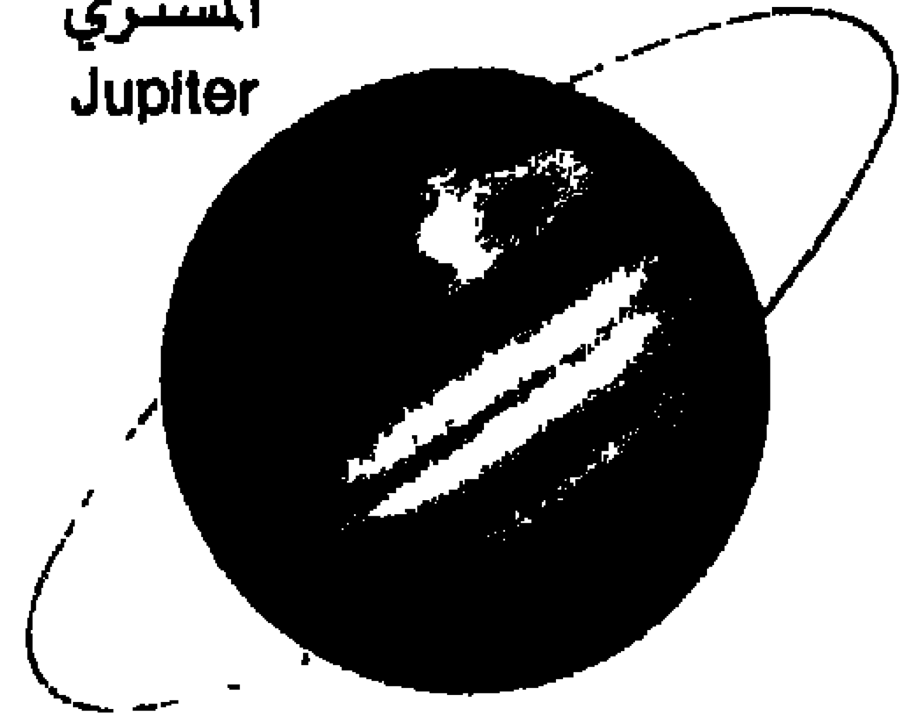
الجزء الثالث

عطارد
Mercure


الزهرة
Vénus


الأرض
Terre


المريخ
Mars


المشتري
Jupiter


الشمس
Soleil

زحل
Saturne


اورانوس
Uranus


نبيتون
Neptune

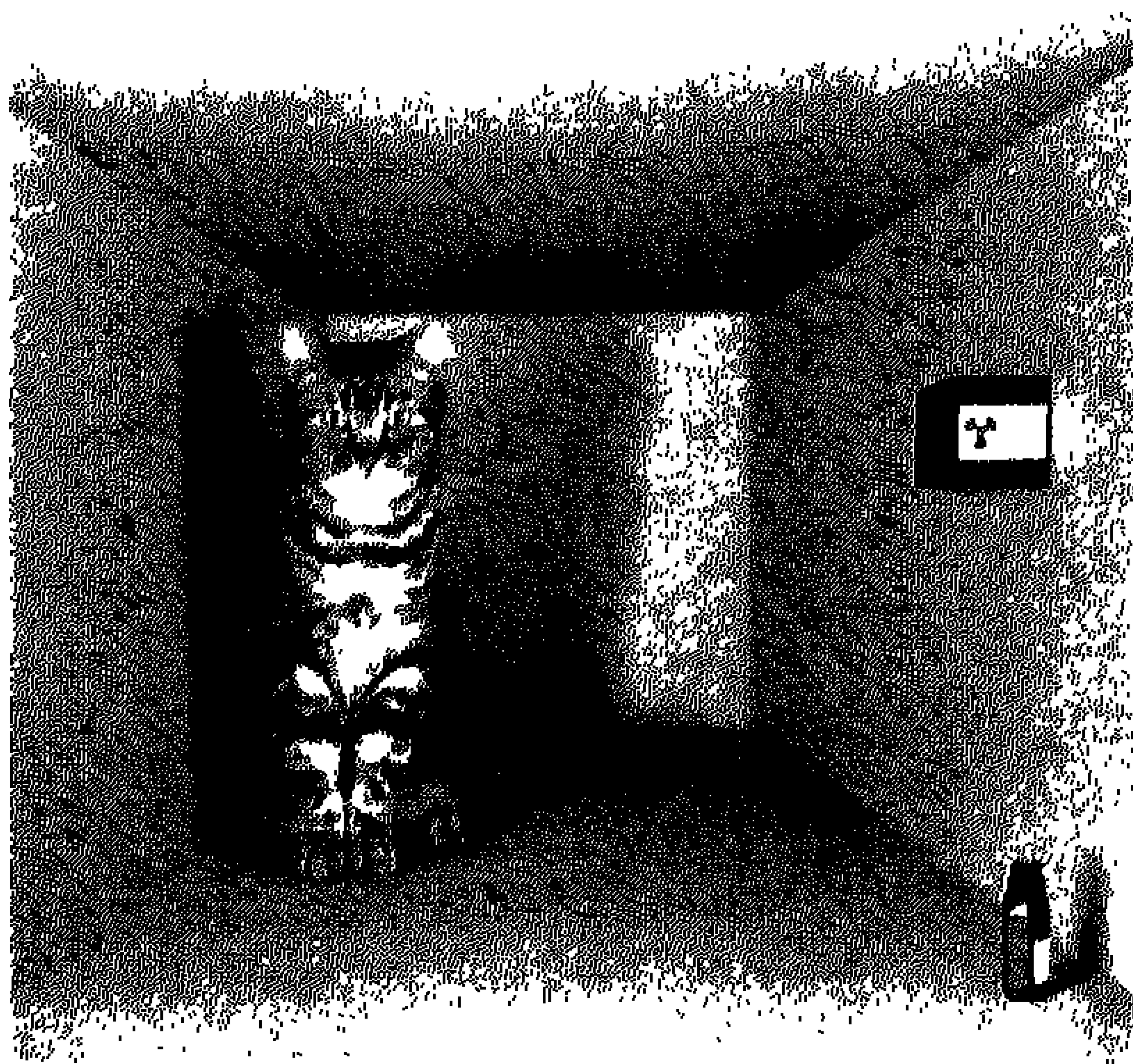

بلوتو
Pluton

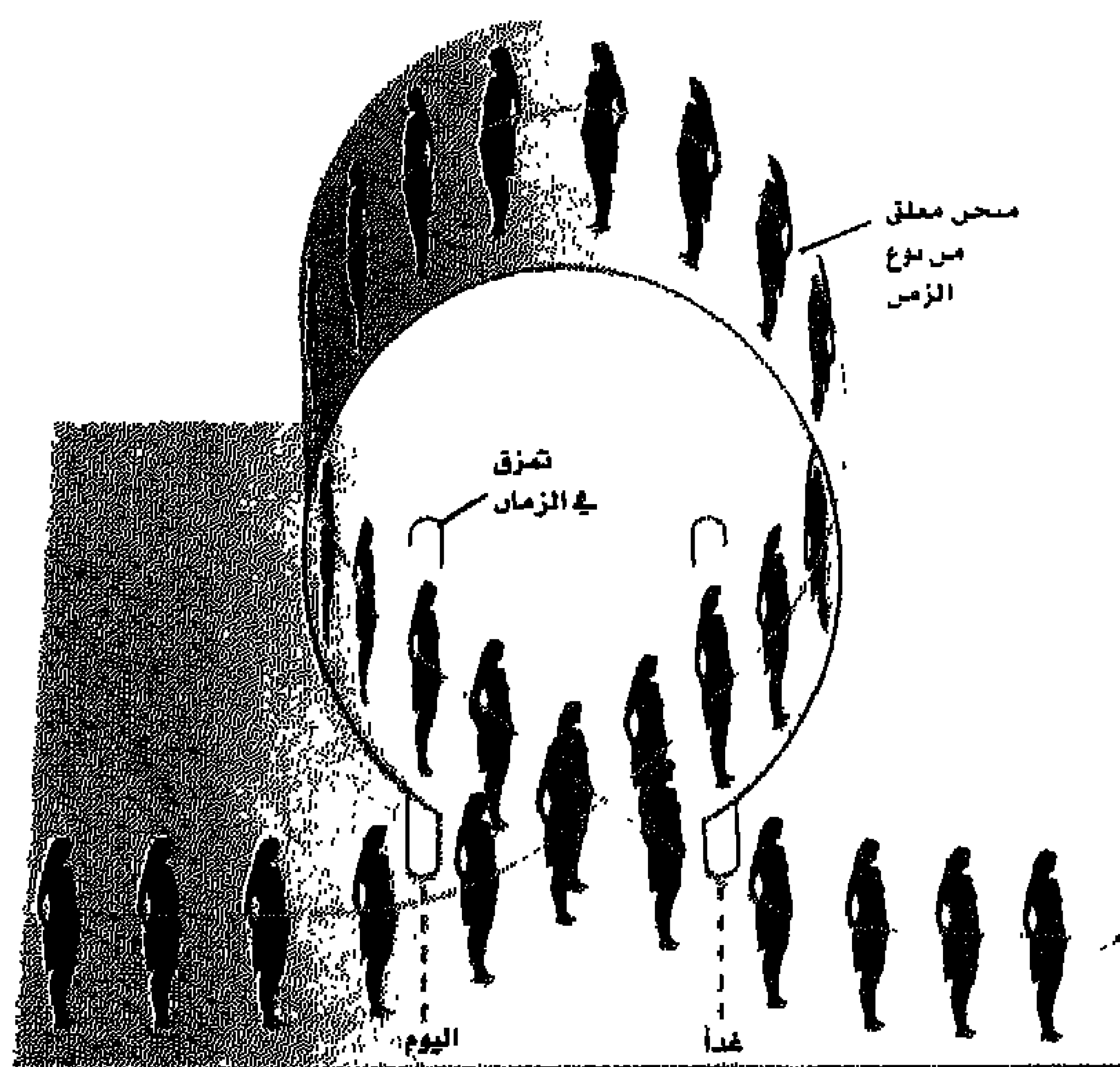

ملاحظـــة:

لقد تم تنضيد النصوص المختارة من مجلة «العلوم» الكويتية كما هي دون تعديل. علماً بأن المقالات والبحـــوث هى من الأعداد التي طبعت في العقد الأخير من القرن العشرين، أو في السنوات الأولى مـــن القـــرن الحـــادي والعشرين، لذا نرجو مراعاة ذلك عند ورود عبارات مثل: القرن الماضي، أو في الأربعينيات من هذا القرن.. طالبين العذر من القارئ الفطن الذي لا تخفى عليه مثل تلك الهنات.

الباب الرابع 4

النسبية وميكانيك الكم





المثنوية في المادة والضوء

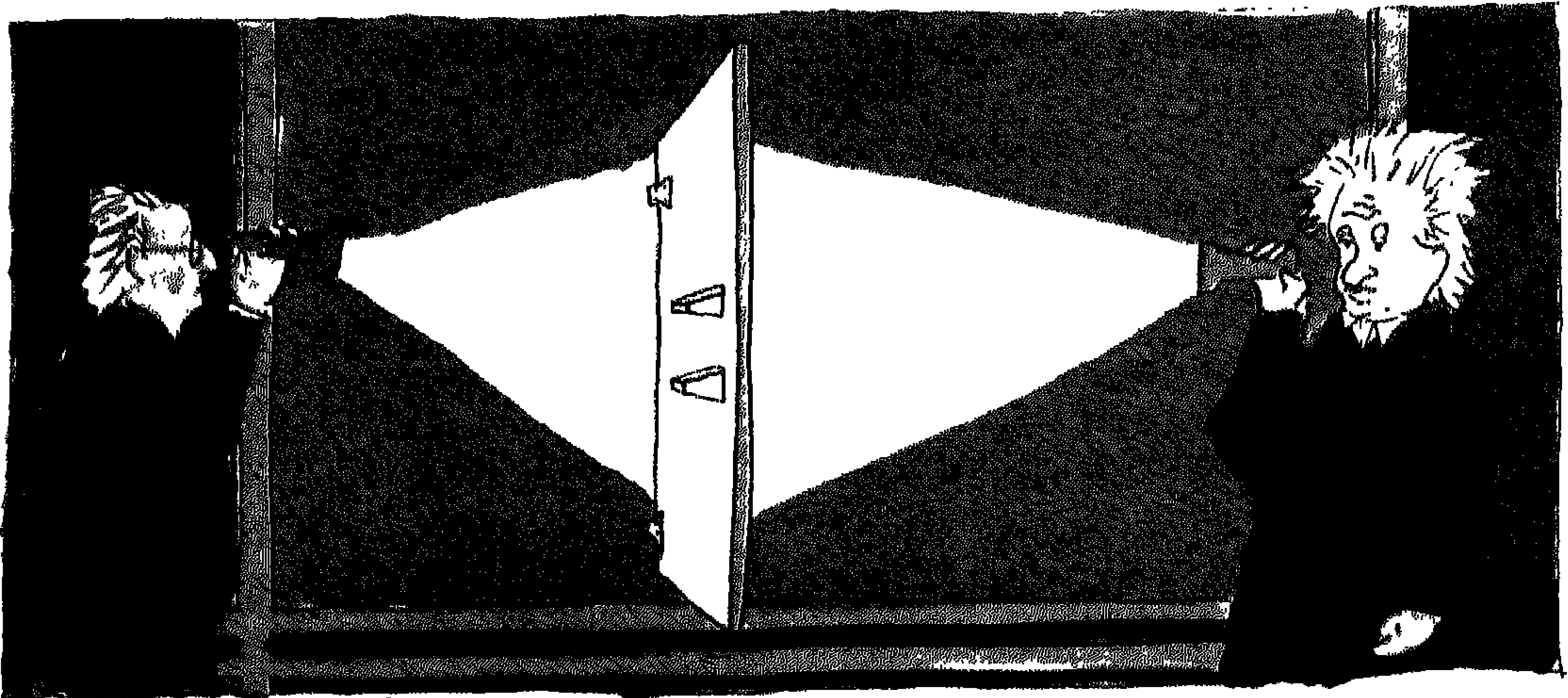
في الميكانيك الكمومي يمكن للأشياء الصغيرة أن تسلك سلوك الأمواج أو سلوك الجسيمات. وتبين الدراسات الحديثة أن سمات التتامية أكثر أساسية مما كان يُعتقد.

(ب.ج. إنكلرت) ــ (م.و. سكولي) ــ (هــ. ولثر).

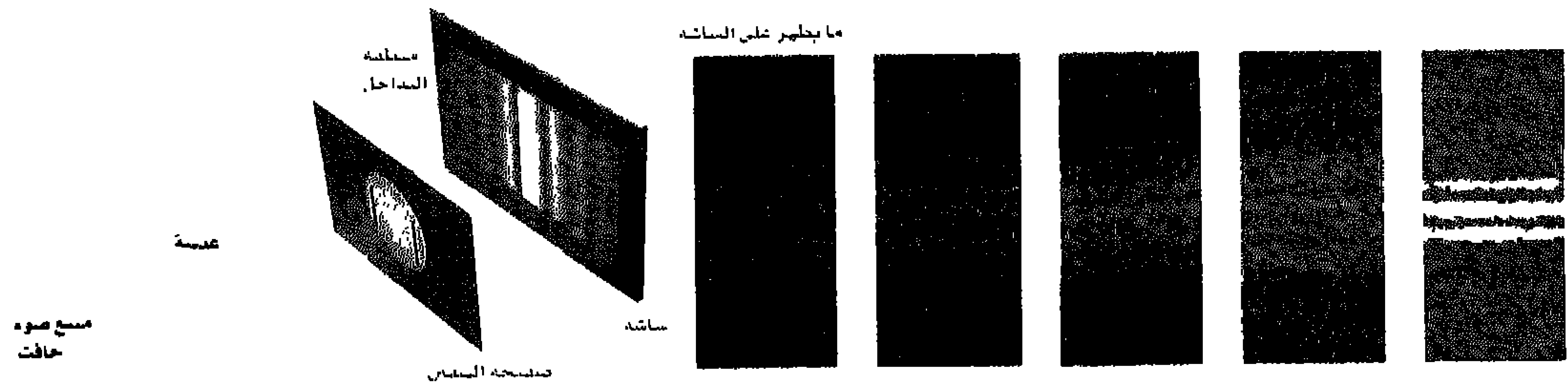
يعج العالم «المكروي» «الصغري» Microcosmos الذي يسود فيه الميكانيك الكمومي، بالظواهر التي تتحدى الحدس العادي. وتنتج كثير من هذه الظواهر من مبدأ التتامية Complementarity Principle الذي يتخذ في معظم الأحيان مظهر المثنوية: موجة/جسيم؛ إذ يمكن أن يظهر سلوك جسم مجهري كالفوتون أو الذرة أو الإلكترون، مشابهاً لسلوك موجة مائية أحياناً أو لسلوك جسيم أحياناً أخرى، حيث يتمم المظهران أحدهما الآخر في الوصف الكامل للجسم. وبما أن فكرة التتامية قد طُرحت للمرة الأولى منذ نحو سبعين عاماً فقد كان الاعتقاد الشائع بين كثير من الفيزيائيين أن التتامية ناتجة من علاقة ارتياب Uncertainity Relation. ووفقاً لهذه القاعدة لا يمكن قياس متحولين متتامين ــ مثل الموضع والاندفاع (كمية الحركة) ــ في الآن ذاته وبدقة أكبر من حد أساسي، أي إن علاقة الارتياب تمنعنا من معرفة كل شيء عن سلوك جسم كمومي. وبالنتيجة لا يمكننا رؤية المظهرين، الموجي والجسيمي، معاً في عملية رصد واحدة.

لقد عملنا مع زملائنا حديثاً في تبيان أن الارتياب ليس المصدر الوحيد للتتامية. كما صممنا وحللنا تجارب حقيقية وذهنية (عقلية) تتجنب ــ فعلاً ــ علاقة الارتياب، أي «يحتال» على الأجسام الكمومية المدروسة. وبالرغم من ذلك دلت التجارب دائماً على أن الطبيعة تحمي نفسها من هذا الاقتحام، أي إن التتامية تظل قائمة حتى عندما لا تقوم علاقة الارتياب بأي دور. وقد استنتجنا من ذلك أن التتامية أكثر عمقاً مما كان يُعتقد: أي إنها، في الميكانيك الكمومي، أكثر شمولية وأساسية من قاعدة الارتياب.

يتجلى كل من السلوكين، الموجي والجسيمي، على حدة عند الاختبار. يظهر السلوك الموجي في أنماط التداخل؛ فإذا ألقينا حجرين في اللحظة نفسها على سطح بحيرة مستقرة نرى كيف تتداخل الأمواج الدائرية بعضها مع بعض فتتعزز بالتضافر حيث تتلاقى قمم الأمواج، كما تُخمد إحداها الأخرى حيث تتلاقى قمة موجة مع حضيض موجة أخرى. ويظهر المفعول نفسه عندما نسلط ضوءاً على شقين (سيعملان عمل الحجرين). تنتقل موجة الضوء عبر الشقين بحيث تنشأ مويجات (أمواج أصغر) عن كل شق. وتتداخل هذه المويجات بعضها مع بعض لتعطي سلسلة من الأهداب المضيئة والمظلمة (نمط تداخل) عند عرضها على شاشة. أما السلوك الجسيمي للضوء فيظهر من خلال الفوتونات التي تُعَدّ



يحلل نيلز بور مع ألبرت اينشتاين تجربة الشقين.



تستعمل تجربة الشقين الأمواج الضوئية ـ المسدّدة بوساطة عدسة ـ لإضاءة صفيحة تحوي شقين يعملان كمصدر لموجتين (كرويتين) Circular تتداخلان معاً لإعطاء أهداب مضيئة ومظلمة على التناوب. ترسل الفوتونات دفعة واحدة في هذه التجربة بحيث يُبنى نمط الأهداب مع ازدياد تسجيل هذه الفوتونات على الشاشة. تقابل الألوان الموجودة على الشاشة عدد الفوتونات التي وصلت إلى كل منطقة: من فوتون واحد إلى تسعة فوتونات (اللون الأزرق)، من عشرة فوتونات إلى تسعة وتسعين فوتون (اللون الأحمر) وأكثر من مئة فوتون (اللون الأصفر). أجرى هذه التجربة (ج. بيركل) في معهد ماكس بلانك للضوئيات الكمومية بألمانيا.

بشكل دائم كوحدات لا تقبل التجزئة، ولذلك بدلاً من تسجيل شدة مستمرة يمكن لمكشاف مناسب عدّ هذه الفوتونات المنفصلة.

يحدث برهان أكثر وضوحاً على وجود الصفتين، الجسيمية والموجية، إذا أرسلنا الفوتونات واحداً تلو الآخر عبر الشقين. وفي هذه الحال يعطي كل فوتون بقعة مضيئة على الشاشة؛ ولكن عندما نجمع النتائج بعد مرور عدد كبير من الفوتونات نلاحظ ظهور نمط التداخل على الشاشة (بشكل خاص يمثّل نمط التداخل احتمال وصول الفوتون إلى نقطة معينة).

إن التتامية العجيبة في الطبيعة لا تقتصر على المثنوية ـ الموجية الجسيمية ـ في طبيعة الضوء، بل إن لمعظم الأجسام الكمومية (كذرّة الفضة مثلاً) بنية داخلية تعطيها خواص مغنطيسية. ومن الممكن أن تدل القياسات على توجه مجموع «أقطاب» هذا «المغنطيس» نحو الأعلى أو نحو الأسفل أو ربما نحو اليمين أو نحو اليسار، ولكن لا يمكن أن نجد أبداً أقطاباً تتجه نحو «الأعلى واليسار»؛ أي إن خاصية الاتجاه نحو الأعلى أو نحو الأسفل تُتمّم خاصية الاتجاه نحو اليسار أو نحو اليمين. كما يتمم السلوك الموجي والسلوك الجسيمي أحدهما الآخر.

إن إمكان التنبؤ بمستقبل إحدى السمتين المتتامتين أمر يثير العجب بسبب ما فيه من غموض. لنفرض أن قياساً قد وجد أن اتجاه المغنطيس المكروي كان نحو الأعلى، ثم أجرينا تجربة ثانية لنعرف ما إذا كان المغنطيس يتجه نحو اليسار أو نحو اليمين، فسيفاجئنا عدم وجود نتيجة متنبأ بها سلفاً: يبلغ احتمال اتجاه قطبي المغنطيس نحو اليمين أو اليسار 50% لكل منهما. فهل تعوزنا معرفة إضافية لكي نتمكن من التنبؤ؟ الجواب هو لا، لأن السبب أعمق من ذلك، فلا يمكننا معرفة نتيجة قياس يسار يمين مسبقاً.

إن هذا الجهل ناتج من مبدأ التتامية الذي ينص على عدم إمكان معرفة قيم متحوّلين متتامين، كالاتجاه «نحو الأعلى أو نحو الأسفل» الذي يتمم الاتجاه «نحو اليمين أو نحو اليسار» في تجربة المغنطيس. والواقع، إن معرفة أحد المتحولين بدقة فائقة تحول دون معرفة أي شيء عن المتحول الآخر المرتبط به . و غالباً ما تُصوّر الكتب هذا القانون باستعمال موضع واندفاع جسيم متحرك كخاصيتين متتامتين. فكلما زادت دقة قياس الموضع نقصت معرفتنا بالاندفاع والعكس بالعكس، حيث يشكل التعبير العددي الدقيق عن هذا القانون ما يعرف بعلاقة هايزنبرك في الارتياب.

إن مبدأ التتامية يعني عدم إمكان حصولنا على المعرفة التامة بالمستقبل (بمعنى الفيزياء التقليدية) في العالم المكروي (الصغري)، فإذا عرفنا جيداً إحدى الخاصيتين المتتامتين لجسم كمومي، عندئذ تختفي عنا الخاصية المتممة.

ففي تجربة الشقين، إذا اكتشفنا (بأية طريقة كانت) الشق الذي عبر منه كل فوتون (وبالتالي عرفنا «المسار الذي سلكه» الفوتون) فإننا نفقد نمط التداخل الذي كان موجوداً على الشاشة. فمعرفة مسار الفوتون تعني إذاً ظهور الطبيعة الجسيمية للفوتونات عند الشقين بدلاً من ظهور الصفة الموجية الضرورية لحدوث التداخل. ويمكننا الاختيار بين معرفة المسار الذي سلكته الفوتونات وبين الحصول على نمط التداخل، ولكن لا يمكننا الحصول على المعلومتين معاً (بالرغم من قولنا السابق عن ظهور الطبيعة الجسيمية عندما تُكشف الجسيمات على الشاشة فلا تخبرنا هذه المعلومة أي شيء عما يحصل عند الشقين اللذين ينشأ نمط التداخل عندهما).

إن التتامية واقع من وقائع الحياة وعلينا التعايش معه. وقد ألح عليها الفيزيائي الدنماركي (نيلز بور) أكثر من أي فيزيائي آخر. كما يعود إليه الفضل الأكبر في إظهار فكرة التتامية كحقيقة أساسية في الطبيعة. ولكن لم يتم تقبل ذلك بسهولة، فمناوئو هذه الفكرة كانوا فيزيائيين بارزين أيضاً، وعلى رأسهم (ألبرت آينشتاين). وقد تركز نقاشهما حول إمكان قياس الخاصيتين المتتامتين في آن واحد. وهاكم نص مناقشة لتخيل فيها واحدة من مناظراتهما التوضيحية العديدة:

بور: أرى أنك ترسم من جديد تجربة الشقين فما هدفك في هذه المرة؟

التتامية والارتياب

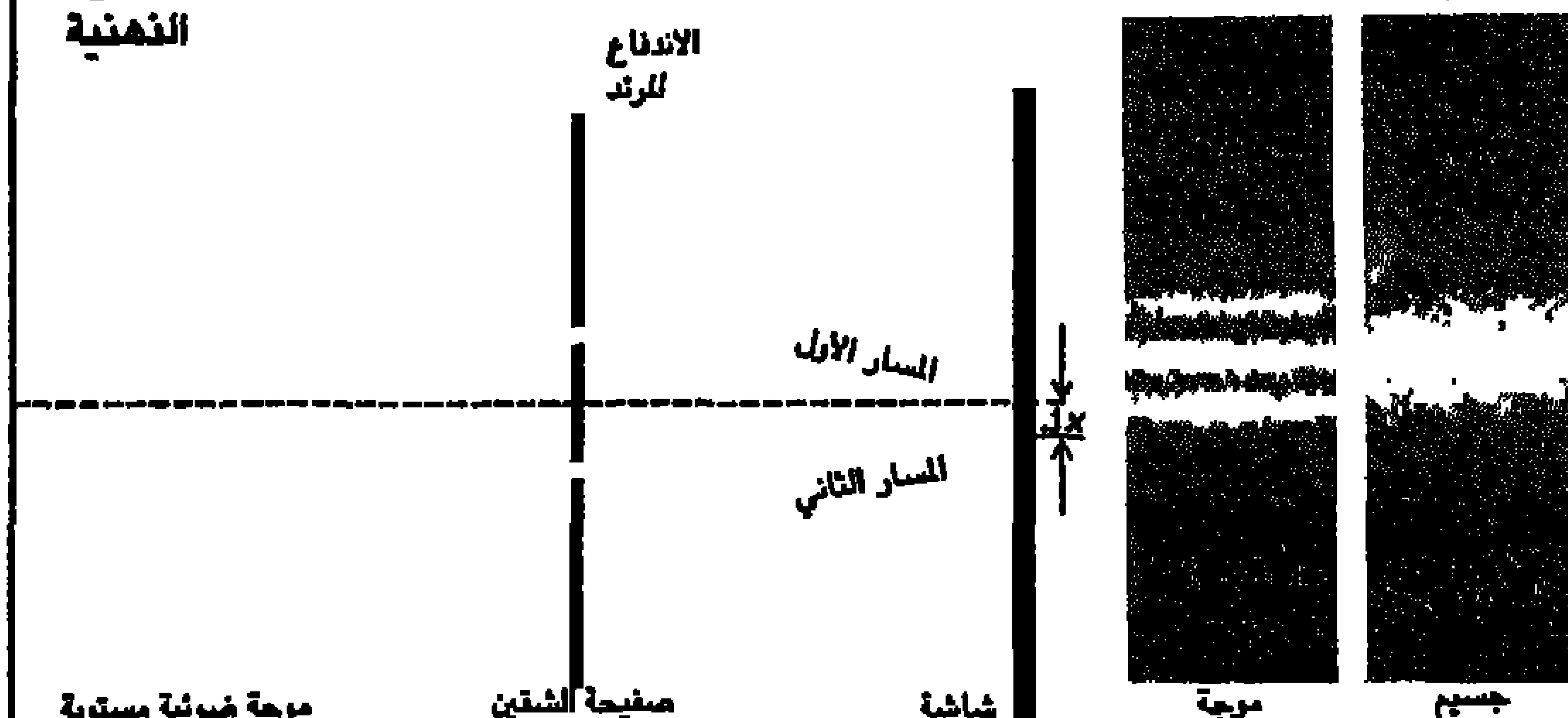
شرح «نيلز بور» لـ«البرت أينشتاين» في المحادثة التخيلية سبب عدم إمكان عمل مكشاف المسار المزعوم فهو لن يتوافق مع علاقة الارتياب، وفي هذا الملحق نستنتج سبب ذلك كميا

أولا، نرمز للمسافة الفاصلة بين العصابة المركزية المضيئة وأول عصابة مجاورة لها بـ ΔX. نعين قيمة المسافة الفاصلة بين الصفيحة (التي تحوي الشقين) والشاشة بدقة كبيرة، وليكن بارتياب قدره δX، وهي قيمة أصغر بكثير من ΔX، وإلا فلن يظهر نمط الأهداب على الشاشة ولن يظهر عوضا عن ذلك إلا نمط الانعراج scatter pattern عبر شق وحيد

أراد أينشتاين رصد ارتداد الصفيحة بهدف معرفة المسار إن للفوتون اندفاعا يساوي hv/c، حيث h هو ثابت پلانك و v تواتر الضوء و C سرعته، (لاحظ أن للاندفاع ثلاثة مركّبات مكانية (حيزية)؛ ولكننا لا نهتم هنا إلا بتغير مركبته الموازية للصفيحة). سيعتمد مقدار اندفاع الارتداد الذي يعطيه الفوتون للصفيحة على الشق الذي عبره الفوتون (ينبغي على الفوتون الانحراف بمقدار أكبر عن أحد الشقين من انحرافه عن الشق الآخر لكي يصل إلى العصابة المضيئة الأولى). وسيبين استعمال شيء من الجبر الرياضياتي اختلاف الاندفاعين المعطيين للشقين بفرق مقداره $h/\Delta X$.

لتعيين مسار الفوتون لا بد من معرفة اندفاع الصفيحة بدقة δp أصغر بكثير من هذا الفرق؛ أي يجب أن يكون $\delta p < h/\Delta x$. وبما أن قيمتي δx و δp يجب أن تكونا أصغر بكثير من Δx و $h/\Delta X$ على الترتيب، فيجب أن يكون الجداء أصغر بكثير من ثابت پلانك h، (العلاقة $\delta X \delta p << h$). وهكذا نصل إلى نتيجة لا يمكن الوصول إليها من خلال علاقة هايزنبرك في الارتياب $\delta X \delta p \geq h/4\pi$ التي يجب أن تصدق في كل الأحوال

وبالنتيجة: إما أن تكون قيمة δX كبيرة جدا للسماح لنمط التداخل بالتشكل، أو أن تكون قيمة δp كبيرة جدا لكي نميز مسارا عن الآخر. تكون هذه الحجة مقنعة تماما لعدم اعتماد العلاقة النهائية $\delta X \delta p << h$ على تفاصيل نمط التداخل حتى ولو تدخلت الكمية ΔX ـ المسافة بين الأهداب ـ في المحاكمة في المراحل الوسطى.



آينشتاين: رويدك يا نيلز حتى أنهي حديثي. تفضل الآن: لدينا موجة ضوئية مستوية تصل إلى صفيحة تحتوي على شقين يمكن أن يعبرهما الضوء كي يصل إلى شاشة. فإذا كانت التجربة مُصممة بشكل حسن وجب أن يظهر على الشاشة نمط للتداخل على شكل سلسلة من العصابات المضيئة والمظلمة على التناوب.

بور: هذا ما نعلّمه لطلابنا، فما الجديد في ذلك؟

آينشتاين: مهلاً يا عزيزي. قبل تقديم الفكرة الجديدة دعني أعرض الأفكار السابقة لكي أتأكد من كوننا على وفاق حولها. هل تتفق معي على أن ظهور نمط التداخل ينبئ بالطبيعة الموجية للضوء؟

بور: بالتأكيد

آينشتاين: وستوافق أيضاً على أن ما تدعوه تتامية يعني عدم وجود طريقة لمعرفة الشق الذي مر أحد الفوتونات عبره ليصل إلى الشاشة ويقدم إسهامه في نمط التداخل.

بور: هذا صحيح أيضاً.

آينشتاين: حسناً، أنت تعلم أنه يصعب عليَّ الاعتقاد بأن الإله يلعب بالنرد. دعني إذاً أتوصل إلى الفكرة الجديدة، فبعكس ما قلناه سابقاً يمكنني معرفة الشق الذي عَبره الفوتون. لنفترض أننا رأينا وصول فوتون إلى شاشة الكشف عند أول منطقة للشدة العظمى (أي عند إحدى العصابتين المضيئتين الملاصقتين للعصابة المركزية)، فللوصول إلى هذه المنطقة يجب أن يحرف الشق الفوتون عن المسار المستقيم.

غير أن إسحق نيوتن قد علمنا عدم وجود فعل من دون رد فعل. ولذلك عندما (تكز) Jolt الصفيحة الفوتون فسيكز الفوتون بدوره الصفيحة. وتعتمد شدة الوكزة على الشق الذي مر الفوتون عبره. وعند تعليق الصفيحة بشكل حساس جداً يمكنني ــ من حيث المبدأ ــ تسجيل ارتدادها، وسيدلني مقدار الارتداد على الشق الذي مر الفوتون عبره.

بور: آه، تقصد أنك تستطيع معرفة المسار الذي سلكه كل فوتون وتشاهد في التجربة نفسها نمط التداخل.

آينشتاين: نعم.

بور: مما يتعارض مع التتامية.

آينشتاين: نعم.

بور: حسناً، ولكنني أخشى أن تكون قد نسيت شيئاً، أقصد أنك نسيت الخواص الكمومية للصفيحة، وبوسعي شرح ذلك من خلال الرياضيات. كما يمكنني تحليل الظاهرة على النحو التالي: من أجل مشاهدة نمط التداخل يجب أن يكون موضع الصفيحة مضبوطاً بدقة.

آينشتاين: بالتأكيد، وإلا لا يمكن لأهداب الشقين أن تتولد، ولن نرى عندئذ سوى النمط الناتج من الانعراج عبر شق واحد.

بور: لكي نميز أحد المسارين عن الآخر علينا أن نعرف بكل دقة اندفاع الصفيحة التي تحمل الشقين. والواقع، إنني أستطيع البرهان على أن ظهور نمط التداخل يتطلب حصراً أن يكون الارتيابان، في موضع الصفيحة واندفاعها المرتد، صغيرين كليهما لدرجة ألا يتعارضا مع علاقة الارتياب.

آينشتاين: حسناً، حسناً يا نيلز، أنت على حق في ذلك. وأنا أقر بعدم إمكان معرفة مسار الفوتون وحصول نمط التداخل في تجربة واحدة. وأنت محق تماماً في تأكيد وجوب احترام الصفيحة لقوانين الميكانيك الكمومي أيضاً. ينبغي عليَّ تهنئتك على تبيان التتامية هذا.

بور: مهلاً، أتظن أن علاقة هايزنبرك ـ كما رأينا في المثال السابق، أو في أي مثال آخر ـ هي دائماً الآلية التي تعزز مبدأ التتامية؟

لئن كنا لا نملك سوى أن نتكهن بجواب آينشتاين عن السؤال الأخير، فإن جوابنا نحن هو «لا»، فالقيود التي تفرضها علاقة الارتياب ليست هي الآلية الوحيدة التي تعزز الطبيعة بها التتامية. وما يسوغ جوابنا السلبي هو اكتشافنا حديثاً إمكان بناء مكاشيف «مكشافات» Detectors تعرّفنا بمسار الفوتون ولا تؤثر بقدر محسوس في حركة الأجسام المرصودة. وهذا يعني إمكان الحصول على مكاشيف تتجنب علاقة الارتياب.

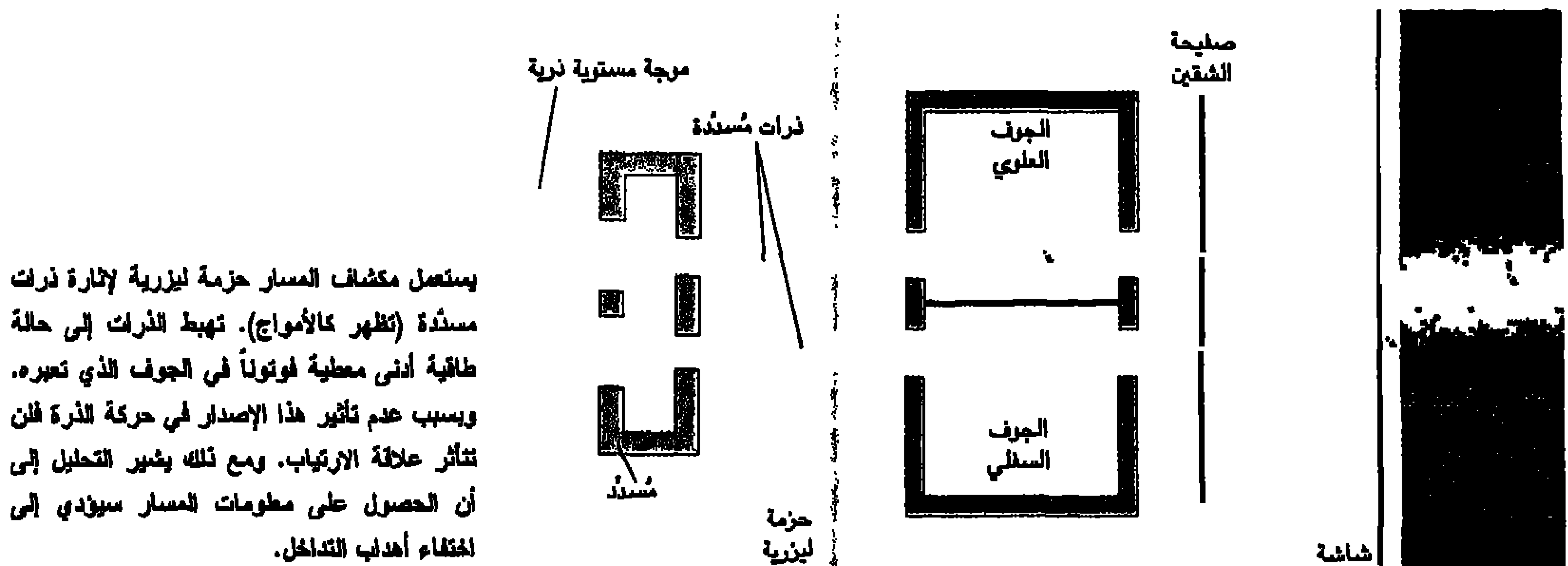
يُستمد مبدأ المكشاف الجديد للمسار من تجربة الشقين. وقد ناقش (ر. فاينمان) أحد أشكال هذه التجربة في مقدمته الرائعة للميكانيك الكمومي المعروضة في الجزء الثالث من كتابه «محاضرات في الفيزياء». فقد لفت فاينمان النظر، في هذا الكتاب، إلى أننا إذا استعملنا الإلكترونات عوضاً عن الفوتونات فإن طريقتنا في معالجة الجسيمات المتداخلة، ستكون مختلفة إذا أُخذ في الحسبان الصفة الموجية للإلكترونات التي يمكنها أن تسلك سلوك الضوء.

وهكذا ستُعطي الإلكترونات نمط تداخل في تجربة الشقين. وبما أن الإلكترونات هي جسيمات مشحونة فإنها تتفاعل مع الحقول الكهرطيسية التي من ضمنها الضوء. وهذا يعني أننا إذا جعلنا الإلكترونات تتفاعل مع الضوء استطعنا معرفة مسار الإلكترون.

اقترح فاينمان طريقة خاصة للحصول على هذه المعرفة. تقضي هذه الطريقة بوضع منبع ضوئي بين الشقين وعلى مسافة واحدة منهما. فالفوتونات، بعد اصطدامها بالإلكترونات، ستنزوي باتجاه ينبئ بما إذا كان الإلكترون قد أتى من الشق العلوي أم من الشق السفلي، مما يتيح معرفة مساره.

تركّز تحليل فاينمان لعملية اصطدام الفوتون مع الإلكترون على متحولين اثنين: أحدهما الاندفاع الذي يكتسبه الإلكترون نتيجة التصادم، والآخر هو الارتياب في دقة تحديد موضع الإلكترون. وعلى غرار ما جاء في الحوار بين آينشتاين وبور حول الشق المرتد لا بد أن تكون الكميتان ضئيلتين إذا أردنا الحصول، دفعة واحدة، على معرفة المسار وعلى نمط التداخل، والأحسن من ذلك أن هاتين الكميتين ستكونان حتماً ضئيلتين لدرجة تنتهك علاقة هايزنبرك الارتيابية.

إن مكشاف المسار الجديد هذا، يتفق مع اقتراح فاينمان؛ بيد أننا صممنا جهازنا بحيث نتفادى التصادم، وبالتالي تبادل الاندفاع. وتستعمل تجربتنا الذهنية (العقلية) الذرات عوضاً عن الإلكترونات كجسيمات تداخلية. وهكذا نضع جوفاً صغيراً (عبارة عن علبة) أمام كل شق بحيث ينبغي على كل ذرة المرور عبر أحد هذين الجوفين قبل عبور الشق الموافق. وقد أحرز باحثون من جامعة ميونخ ومن معهد ماكس بلانك في ألمانيا ومن جامعة ييل في الولايات المتحدة الأمريكية ومن دار المعلمين العليا في باريس، تقدماً هائلاً في تطوير الطرق التجريبية الضرورية لذلك في السنوات الأخيرة، وهم يستطيعون الآن إجراء تجارب تعبر فيها ذرات وحيدة (واحدة تلو الأخرى) هذه الأجواف.



يستعمل مكشاف المسار حزمة ليزرية لإثارة ذرات مسدّدة (تظهر كالأمواج). تهبط الذرات إلى حالة طاقية أدنى معطية فوتوناً في الجوف الذي تعبره. وبسبب عدم تأثير هذا الإصدار في حركة الذرة فلن تتأثر علاقة الارتياب. ومع ذلك يشير التحليل إلى أن الحصول على معلومات المسار سيؤدي إلى اختفاء أهداب التداخل.

ينبغي علينا توليف وتيرة حزمة الليزر بحيث تُثار كل ذرة تعبر الحزمة. وهذا يعني امتصاص الذرة لفوتون ليزري طول موجته صغير، ومن ثم انتقالها إلى مستوى طاقي أعلى. ومن شأن شكل الجوفين أن يجبر الذرات على إطلاق فوتون ذي طول موجة كبير (يعادل هذا الطول الموجي إشعاع فرن الأمواج المكروية). وعندئذ تكفي معرفة موضع الفوتون ذي طول الموجة الكبير لتبين الجوف (وبالتالي الشق) الذي عبرته ذرة بعينها. فهذه التجربة لا تمس علاقة هايزنبرك في الارتياب بأي ضرر، لأن إطلاق الفوتون لا يؤدي إلى إحداث اضطراب في حركة الذرة. وللتقليل من الإشارات المتطفلة يجب حفظ الجوفين (الحقيقيين) في حالة فائقة البرودة، ويجب أيضاً أن تكون جدرانهما فائقة الموصلية لضمان بقاء الفوتونات مخزونة فيها مدة طويلة.

ولعدم تأثير منظومة الكشف في حركة الذرات يمكننا التخمين بأن الذرة ستظل محتفظة بقدرتها على التداخل. وهكذا سنحصل على معرفة المسار (وهذا ينبئ بالطبيعة الجسيمية للذرة) وعلى نمط التداخل (وهذا ينبئ بطبيعتها الموجية).

لكن هذا التخمين الساذج ليس صحيحاً، لأن تحليلنا ينبئ باستحالة الحصول على معرفة المسار وعلى نموذج التداخل معاً، فبمجرد الحصول على معرفة المسار تختفي أهداب التداخل من الشاشة، ونحصل على بقعة واسعة في وسط الشاشة بدلاً من ظهور الأهداب. وهكذا نستطيع الالتفاف على علاقة هايزنبرك في الارتياب ولكن لا يمكننا تجنب مبدأ بور في التتامية.

إن بقاء التتامية ينبع من سر عميق. ومفتاح هذا السر يكمن في العلاقات المتبادلة بين حركة الذرة وبين فوتونات الجوف الذي اخترقته الذرة والتي تسبب اختفاء نمط التداخل؛ أي إن الأمور تحدث وكأن كل ذرة تحمل علامة (واسمة) تدل على الشق الذي مرت عبره، فالذرات التي تعبر الشق العلوي لا تتداخل مع تلك التي تعبر الشق السفلي. أما العلامة فهي ليست إلا الفوتون المنحرف الذي أطلقته الذرة، والذي يظل محتفظاً بعلامته. يمكن أن تبعد الشاشة التي يحتمل ظهور الصفات التداخلية عليها بأي مسافة عن جوفي مكشاف المسار، وهذا يعني عدم وجود أي دور لهذا البعد في العلاقات المتبادلة المذكورة. وحالما تقوم هذه العلاقات بين الذرة المعلَّمة والجوف الذي تدخله فإنها تبقى قائمة بعد ذلك.

عند هذه المرحلة لم يعد بوسع النظري التقليدي[1] Classical Intutionist (CI) ضبط نفسه، مما يحدو به إلى التحول إلى صديقه الميكانيكي الكمومي Quantum Mechanic.

[1] عمد المؤلفون إلى التفريق بين الفيزيائيين؛ فالأول هو نظري تقليدي لم يدخل في دقائق الأمور، أما الآخر فهو ميكانيكي كمومي وصل بعلمه الميكانيكي إلى معرفة دقائق مهنته. (المحرر)

النظري التقليدي: لقد أصغيت بما فيه الكفاية، ولكن صبري نفد الآن، إنني مستعد للموافقة على الحجج السابقة القائمة على علاقة هايزنبرك في الارتياب، وأقبل بأن وجود معلومات عن المسار يقصي ظهور نمط التداخل. ولكن إذا كان الأمر كذلك فالسبب حتماً هو أن المجرب يسبب اضطراب حركة الجسيم لدى سعيه للحصول على معرفة المسار، وهذا يعني بالتالي أن الجسيم فقد بعض قدرته على التداخل.

الميكانيكي الكمومي: عندما تقول «يسبب اضطراباً» هل يذهب ذهنك نحو شيء مثل وكزة غير متحكم فيها؟

النظري التقليدي: طبعاً.

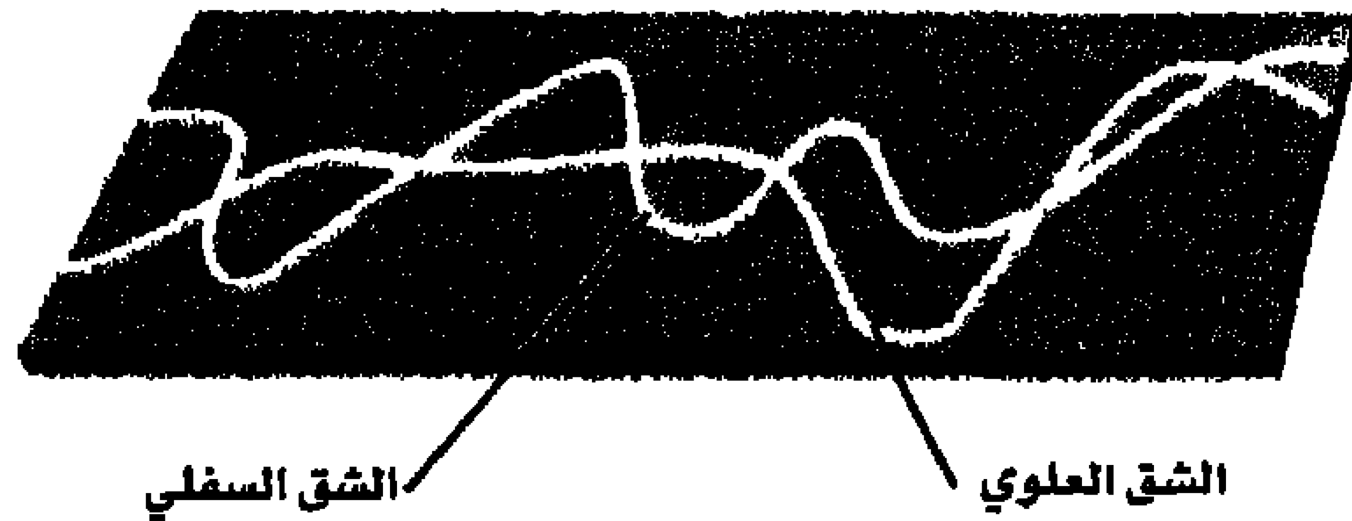
الميكانيكي الكمومي: إذاً أنت مخطئ؛ إذ يبين مثال الجوفين المكشافين إمكان الحصول على معرفة المسار من دون حدوث اضطراب ميكانيكي يذكر.

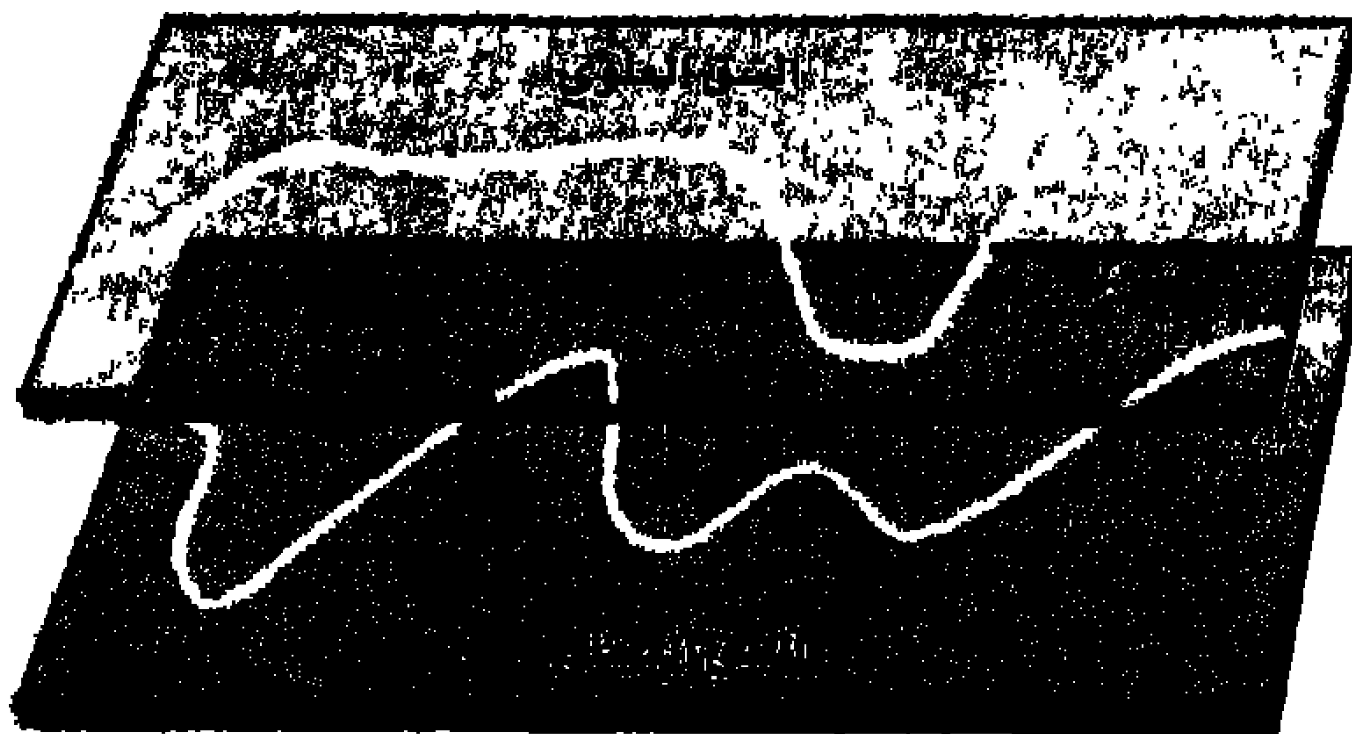
النظري التقليدي: يمكنني قبول محاكمتك، ولكن ساعدني من فضلك على فهم النتيجة. فلماذا لا يتداخل الجسيم إذا لم تكن حركته قد اضطربت؟

الميكانيكي الكمومي: بسبب وجود علاقات متبادلة.

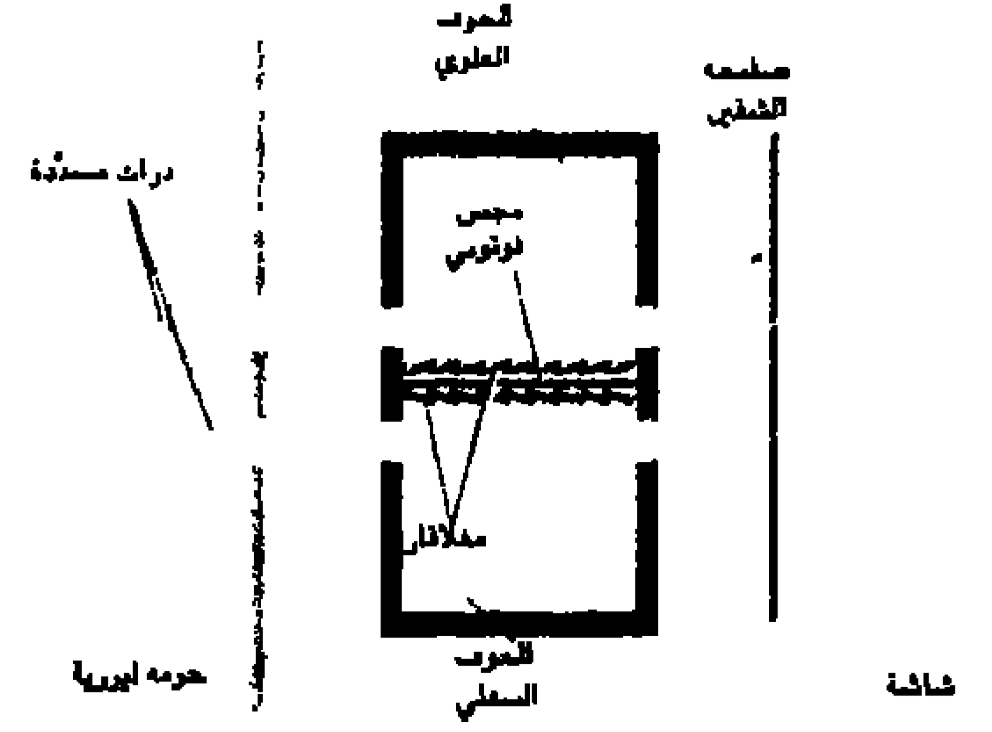
النظري التقليدي: عفواً، ولكن كلمة «علاقات» لا تساعدني على الفهم.

الميكانيكي الكمومي: حسناً، لربما يفيدنا التشبيه التالي: دعنا نمثل حالتي مرور الذرة عبر الشق العلوي أو عبر الشق السفلي بمنحنيين ملتويين مرسومين في مستو أفقي. نقول إن المنحنيين يتداخلان في مواضع تقاطعهما. ونرسم الخطين بحيث يتقاطعان مراراً وهذا يحدث ست مرات في الشكل.





يمثل المنحنيان في المستوي احتمال مرور الذرة من الشق العلوي أو من الشق السفلي (في الأعلى). تقابل أهداب التداخل نقاط التقاطع، ولكن عند حصول علاقات متبادلة (في الأسفل) يكون المنحنيان في مستويين مختلفين، ولا يعودان متقاطعين، وبالنتيجة لا يكون هناك أي تداخل.



يشكل (الماحي الكمومي) quantum Eraser نوعاً من مكشاف المسار. يفتح المغلاقان بعد أن تضرب الذرة الشاشة، فإذا امتص المجس فوتون الجوف سيكون لون البقعة على الشاشة أحمر، وإذا لم يمتصه المجس سيكون لون البقعة أخضر. تعطي البقع الحمراء أهداب التداخل، أما البقع الخضراء فتعطي نمطاً متمماً لهذه الأهداب.

النظري التقليدي: حسناً، وماذا يحصل بعد ذلك؟

الميكانيكي الكمومي: لندخل الآن درجة حرية جديدة (وهي البعد الثالث في هذا التشبيه)، كما نمثل العلاقات بفصل أحد المنحنيين بعدة سنتيمترات فوق الآخر. وهكذا لم يعد تقاطع المنحنيين قائماً (بمعنى أنه لم يبق بينهما تداخل). نلاحظ، بغض النظر عن العلاقات ولكن بإهمال البعد الثالث وإسقاط كلا المنحنيين على مستو مشترك، أن التقاطع بين المنحنيين يبدو موجوداً على الرغم من أنهما يتقابلان من دون أن يتقاطعا.

النظري التقليدي: هكذا إذاً، أظن أنه أصبح عندي الآن رؤية حدسية أوسع لما يجري. أي باختصار، إن نمط التداخل يضيع بسبب معرفتنا بالمسار وليس بسبب الارتياب في موضع الشقين أو بسبب الوكزات غير المتحكم فيها التي تتعرض لها الذرة.

الميكانيكي الكمومي: تماماً، وليس هناك أي عامل عشوائي في ذلك.

بسبب التاريخ الحافل لهذا الموضوع (والكتب العديدة التي تتناول علاقة الارتياب) ظل تحليلنا موضع شك لدى العديد من الزملاء المهتمين بالموضوع. وقد قدّم بعضهم اعتراضات حاذقة على النتيجة التي تنص على عدم اضطراب حركة الذرة. غير أن الحسابات الدقيقة والتجربة المجراة في مختبر (J.D. واينلاند) من المعهد الوطني الأمريكي للمقاييس والتقانة (NIST) بينت من دون شك عدم صحة هذه الاعتراضات. ومن المؤكد الآن أن مبدأ التتامية هو أكثر أساسية من علاقة الارتياب.

بما أن معرفة المسار تؤدي إلى اختفاء التداخل، يمكننا أن نطرح بالمقابل السؤال التالي: هل يعود التداخل إلى الظهور إذا محونا معرفة المسار بأن نمتص الفوتون الشاهد بطريقة ما؟

قد يكون للمحو الكمومي Quantum Erasure معنى معقول مع أنه قد لا يكفي لاستعادة نمط التداخل. صحيح إن مشاهدة نمط التداخل تنبئ بعدم الدقة في معرفة المسار، وإن معرفتنا بالمسار تعوق ظهور نمط التداخل، ولكن استنتاجنا أن سوء معرفة المسار يقتضي ظهور نمط التداخل هو استنتاج خطأ. فالجواب عن سؤالنا هو أن التداخل لا يعود إلى الظهور إلا إذا تولد من المحو علاقات متبادلة جديدة، أي إن المحو يجب أن يحدث ضمن شروط مضبوطة بدقة.

إن من الصعب جدا تنفيذ المحو الكمومي تجريبياً، وهو أمر لم يتم حتى الآن. وبدلاً من ذلك نعرض تجربة ذهنية (عقلية) تقتضي توافر عدد من الشروط المثالية ولكنها تفي تماماً بالغرض لأنها تشمل كل المظاهر المهمة للقضية.

وفي التجربة الذهنية نضع مجساً فوتونياً بين الجوفين ومغلاقين يفصلان بينهما، ومادام المغلاقان مرصودين فإننا نكون في حالة مكشاف المسار التي عرضناها سابقاً.

نبدأ التجربة في حالة يكون فيها الجوفان فارغين والمغلاقان موصدين. ثم نرسل إلى داخل الجهاز ذرة مثارة تتخلص من فوتون في أحد الجوفين. وهكذا يكون احتمال احتواء أي من الجوفين على فوتون مساوياً 50%. يبقى الفوتون في أحد الجوفين وتصل الذرة التي أطلقته إلى الشاشة وتسبب ظهور علامة عليها، وحال حدوث ذلك نفتح كلا المغلاقين في الوقت نفسه محوّلين الجوفين المنفصلين إلى جوف واحد أكبر حجماً.

يؤدي فتح المغلاقين إلى حدوث مفعول (تأثير) غير عادي على الفوتون؛ إذ يمكننا افتراض وجوده في أي مكان، ولذلك سيسجل المجس الإشارة دائماً. غير أن الفوتون هو جسم كمومي ذو خواص موجية. ولنتذكر أن احتمال وجود الفوتون في أحد الجوفين قبل فتح المغلاقين كان مساوياً 50%. يمكننا النظر إلى هذه المسألة من زاوية أخرى بقولنا إن الموجة المواكبة للفوتون تتألف من **موجتين جزئيتين** Partial Waves، كل واحدة منهما موجودة في كلا الجوفين. وعند فتح المغلاقين تتحور موجة الفوتون بحيث تتوافق مع الجوف الجديد الأكبر. ويمكن وصف التغير كأنه «اندماج» الموجتين الجزئيتين الأصليتين لتصبحا موجة نهائية واحدة.

يمكن أن يحدث الاندماج بصور مختلفة فإذا عززت إحدى الموجتين الثانويتين الأخرى عند موضع المجس الفوتوني فسيلتقط المجس الفوتون. وبالمقابل، إذا تفانت الموجتان بالتداخل الهدام فلن يكشف المجس الفوتون. ويحدث الاحتمال ــ في كلتا الحالتين ــ بقدر متساو، ومن المستحيل التحكم أو التنبؤ بالنتيجة. وبالتالي تبلغ نسبة احتمال كشف المجس للفوتون الصادر عن الذرة بعد فتح المغلاقين 50%.

إذا امتص المجس الفوتون نلوّن موقع البقعة التي تتركها الذرة على الشاشة باللون الأحمر للدلالة على أن فوتون الجوف قد انمحى، أما إذا فشل المجس في تسجيل أي شيء فنلون البقعة باللون الأخضر، ثم نبدأ من جديد مع الذرة التالية. وبالمحصلة سيسهم نصف عدد الذرات في مجموعة البقع الحمراء والنصف الآخر في البقع الخضراء.

ما شكل النمط الذي سيظهر على الشاشة؟ إن مجموعة البقع الحمراء ستعطي نمط التداخل الذي كنا نحصل عليه في حالة وجود الشقين وحدهما. ومن دون وجود الجوفين كاشفي المسار: أي إن انمحاء الفوتون الشاهد سيؤدي إلى ظهور نمط التداخل من جديد. أما مجموعة النقاط الخضراء فتشكل نمطاً متمماً: أي إن الذرا الخضراء تنطبق على مناطق الحضيض الحمراء. والعكس بالعكس. فلو أخذنا للشاشة صورة بالأبيض والأسود فلن يظهر عليها أي شيء ينبئ بحصول تداخل. وهذا كله يعني أن إظهار التداخل لا يمكن أن يحدث إلا بوجود علاقات متبادلة بين المجس الفوتوني والذرات.

وباستعمالنا المشابهة الميكانيكية الكمومية للمنحنيات الموجودة في مستوٍ يمكننا التسليم بأن المنحنيين العلوي والسفلي يقابلان قطعاً حمراء وأخرى خضراء خلال عملية المحو، وتزاح هذه القطع نحو مستويين موافقين بحيث تتداخل القطع الحمراء بعضها مع بعض، كما يحدث الشيء نفسه بالنسبة للقطع الخضراء. ولكن بسبب عدم تداخل القطع الحمراء مع الخضراء يجب علينا إبقاؤهما منفصلين إذا أردنا أن نشاهد نمط التداخل.

لا يؤثر المحو في حركة الذرة لأنه يحدث بعد وصول الذرة إلى الشاشة. فالخيار متروك إذاً للمجرب: هل نريد معرفة ما إذا كانت الذرة ـــ التي سجلنا للتو وصولها ـــ قادمة من «الشق العلوي» أم من «الشق السفلي»، أو نريد معرفة ما إذا كان المجس الفوتوني قد أثير (لون أحمر) أم لا (لون أخضر)؟ يقابل هذان التساؤلان خاصيتين متتامتين للمنظومة المرصودة، فمعرفة الجوابين أمر مستحيل؛ إذ لا يمكننا أبدا وسم ذرة بأنها «قادمة من الشق العلوي» أو لون «أحمر» مثلما كان الوصف «نحو الأعلى واليسار» غير ممكن عندما وصفنا الخواص المغنطيسية لذرة الفضة. وهكذا نرى ظهور التتامية من جديد.

تمتاز طريقة المحو الموصوفة آنفا بسهولة وصفها وتحليلها، ولكن إجراء التجربة نفسها قضية أخرى، وهي مازالت في حاجة إلى سنوات من العمل الجاد. فالصعوبة الأولى فيها هي «هشاشة» الذرات الموجودة في الحالة المثارة ورغبتها في التخلص سريعاً من الفوتون الذي تحمله.

من المحتمل ألا تُستعمل الذرات كأجسام تداخلية في أوائل تجارب المحو. وفي الواقع لا يعتمد الكثير من هذه المقاييس التداخلية المتقدمة على وجود الشقين؛ إذ يستعمل الباحثون أزواجاً فوتونية كأجسام كمومية من أجل دراسة هذه الأفكار. كما تستعمل التجربة المجراة في المعهد NIST، التي ذكرناها سابقاً، مكاشيف للمسار من دون مفعول الارتداد لكشف الضوء المنعرج عن الذرتين بدلاً من العراجه عبر الشقين. ولربما أمكن إجراء تعديل في هذه التجربة بحيث نحصل على تجربة محو كمومي.

إننا لا ننتظر نتائج داحضة للميكانيك الكمومي، فالعالم الكمومي حمى نفسه بعناية من كل تناقض داخلي، لذا فإن ظهور أي خلل غير متوقع سوف ينبئ في معظم الأحيان بقصور في الجهاز المستعمل وليس بقصور الميكانيك الكمومي نفسه. فعلى الرغم من براعة الإنسان في التجارب العلمية، تظل الطبيعة متقدمة علينا بأشواط.

المؤلفون

B-G. Englert – M. O. Scully – H. Walther

يتفكرون في المظاهر الأساسية للفيزياء الكمومية. نال إنكلرت الدكتوراه من جامعة توبنكن وهو الآن أستاذ في جامعة ميونخ وباحث في معهد ماكس بلانك للضوئيات الكمومية في ألمانيا. وعمل باحثاً زائراً في جامعة نيومكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية وفي بولندا وهنغاريا وفرنسا. حصل سكولي على الدكتوراه من جامعة ييل، ونال العديد من الجوائز في الضوئيات الكمومية. وهو الآن أستاذ في جامعة تكساس وباحث في مركز هيوستون للبحوث المتقدمة بالولايات المتحدة الأمريكية وفي معهد ماكس بلانك للضوئيات الكمومية بألمانيا. أما ولثر الذي حصل على الدكتوراه من جامعة هيدلبرك في ألمانيا فهو نائب رئيس جمعية ماكس بلانك ومدير معهد ماكس بلانك للضوئيات الكمومية، ونال العديد من الجوائز والدرجات الشرفية. عمل ولثر في عضوية هيئات تحرير عدة مجلات وجمعيات علمية.

مراجع للاستزادة

QUANTUM ERASER: A PROPOSED PHOTON CORRELATION EXPERIMENT CONCERNING OBSERVATION AND "DELAYED CHOICE" IN QUANTUM MECHANICS. M. O. Scully and K. Drühl in *Physical Review* A, Vol. 25, No. 4, Pages 2208-2213: April 1982.

QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. John A. wheeler and Wojciech H. Zurek. Princeton University Press, 1983.

QUANTUM OPTICAL TESTS OF COMPLEMENTARITY. M. O. Scully, B.-G. Englert and H. Walther in *Nature*, Vol. 351, No. 6322, Pages 111-116: May 9, 1991.

YOUNG'S INTERFERENCE EXPERIMENT WITH LIGHT SCATTERED FROM TWO ATOMS.U. Eichmann et al. In *Physical Review Letters*, Vol. 70, No. 16, Pages 2359-2362: April 19, 1993.

THE MICROMASER: A PROVING GROUND FOR QUANTUM PHYSICS. Georg Raithel, Christian Wagner, H.Walther, L. M. Narducci and M.O. *Scully in Cavity Quantum Electrodynamics*. Edited by Paul R. Berman. Academic Press, 1994.



بديل نظرية بوم حول تفسير ميكانيك الكم

هذه النظرية التي أهملت إلى حد ما خلال العقود الأربعة الماضية، تتحدى صورة الواقع الاحتمالية الذاتية الكامنة في الصيغة المعتادة لميكانيك الكم.

(د.ز. ألبرت)

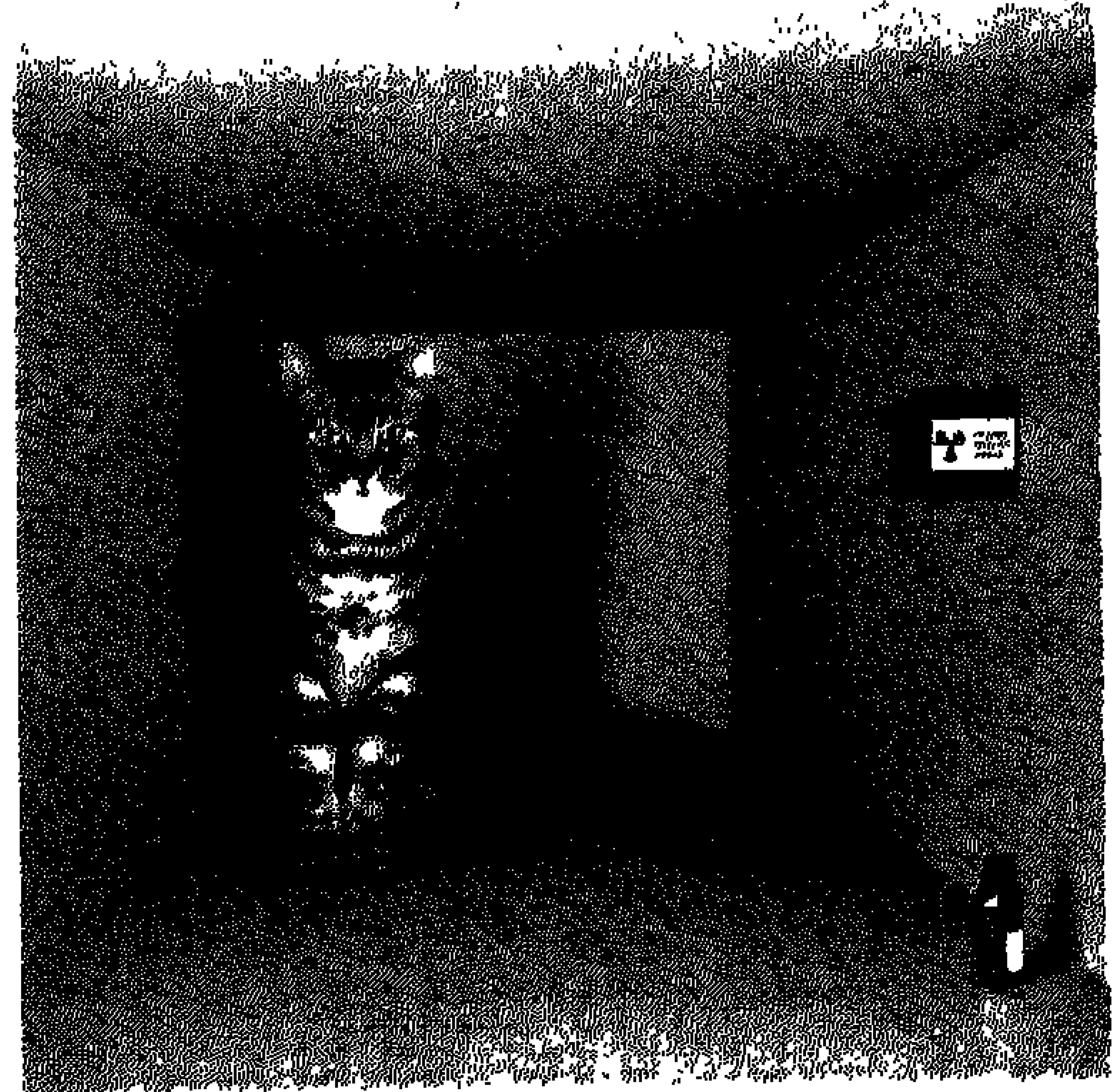
يُفترض أن تكون دراسة سلوك الجسيمات (دون الذرية) -Sub Atomic في القرن العشرين قد أثبتت على الأقل ثلاث حقائق غاية في الغرابة بخصوص العالم المادي. أولى هذه الحقائق أن المصادفة البحتة تحكم أكثر الأحداث عمقاً في الطبيعة. والحقيقة الثانية هي أن الأشياء المادية بالرغم من كونها تشغل دائماً حيزاً من (الفضاء) Space، فإنه توجد حالات لا تشغل فيها هذه الأشياء حيزاً معيناً من الفضاء. والحقيقة الثالثة، التي ربما تكون أكثر هذه الحقائق إثارة للدهشة، هي أن القوانين الأساسية التي تحكم سلوكيات الأشياء المادية «العادية» تفشل فشلاً ذريعاً عند تطبيقها على الأشياء التي تؤدي وظيفة مثل «آلات القياس» أو«الراصدين». وهذا، على أي حال، هو ما قرره الذين وضعوا أسس ميكانيك الكم، أي بعبارة أخرى، هذا ما أصبح تقريباً منذ ذلك التاريخ العقيدة الراسخة الرسمية في الفيزياء النظرية، وهذا ما تقوله النظرية حتى يومنا هذا في جميع المراجع المتداولة في هذا الموضوع.

ولكن بدأ يظهر الآن أن هذه الاستنتاجات كانت متسرعة بعض الشيء. والواقع إنه توجد نظرية كاملة تماماً ومختلفة جذرياً عن ذلك يمكن بوساطتها تفسير جميع السلوكيات المعلومة عن الجسيمات دون الذرية، ولا تؤدي المصادفة أي دور على الإطلاق في هذه النظرية، كما أن كل شيء مادي يشغل منطقة معينة من الفضاء في كل الأحوال. فضلاً عن ذلك، تُصاغ هذه النظريـــة في صورة مجموعة واحدة من القوانين الفيزيائية التي تطبق بأسلوب واحد بالضبط على جميع الأشياء التي لها وجود.

يرجع الفضل أساساً في وضع هذه النظرية إلى العالم الراحل (د.ج. بوم) Bohm الذي كان أستاذاً في كلية بركبك بلندن. وبالرغم من أن صياغته للنظرية كانت موجودة في المنشورات العلمية لأكثر من أربعين عاماً، فقد تجاهلها – إلى عهد قريب جداً – معظم الباحثين. وخلال هذه الفترة كان التفكير السائد حول مثل هذه الأمور تحت سيطرة العقيدة المعهودة، غير القابلة للمناقشة، والتي تسمى أحياناً تفسير كوبنهاكن لميكانيك الكم، لأن هذا التفسير يرجع أساساً إلى عالم الفيزياء الدانمركي (N. بور) Bohr والعلماء المحيطين به.

سأبدأ هذه المقالة بالإشارة إلى الحجج الرئيسية التي تستند إليها هذه العقيدة المطلقة التي تعودنا عليها. وبعد ذلك سأوضح باختصار كيف تتمكن نظرية بوم من الالتفاف على بعض هذه الحجج. وأخيراً سأذكر باختصار كيف وأين تتفق نظرية بوم مع التخمينات المعاصرة حول أسس ميكانيك الكم.

وربما تكون أبسط الطرق لصياغة حجج العقيدة المطلقة القائمة هي أن تكون هذه الصياغة في إطار تجارب معينة على الإلكترونـــات . وجميع هذه التجارب تتضمن قياسات لمركبتين لما



إن القطة الكمومية الحية هي إحدى النتائج الممكنة لتجربة شرودنكر الذهنية الشهيرة. ففي هذه التجربة يؤدي انبعاث جسيم من مادة مشعة إلى انسياب سم زعاف. والمشكلة التي تثيرها التجربة هي التوفيق بين حقيقتين. أولاهما، وهي ناتجة من الرصد، هي أننا نرى القطط إما حية أو ميتة. والثانية، هي أنه يبدو أن معادلات الحركة الخطية في ميكانيك الكم تتنبأ بأن القطط يمكنها أن توجد في حالة شاذة وغير قابلة للتصور، وهي أن تكون غير حية وغير ميتة. وفي الصياغة المعتادة، التي تسمى في بعض الأحيان (تفسير كوبنهاكن) Copenhagen Interpretation، تقتضي معالجة هذه المسألة تخصيص دور لا مثيل له ولا غنى عنه للراصد، أو جهاز القياس، للحصول على نتيجة محددة. وترفض نظرية بوم هذه الصورة الذاتية. وأحد الأمور المهمة التي توصلت إليها هذه النظرية هو أن حل المسألة لا يقتضي إيلاء أي دور خاص للراصد.

تعودنا تسميته (سبين «لف») Spin الإلكترونات. ولتبسيط الأمر سنطلق على هاتين المركبتين السبين الأفقي والسبين الشاقولي.

توجد حقيقة تجريبية ــ في حدود معرفتنا الحالية ــ تنص على أن السبين الأفقي للإلكترونات يساوي واحدة فقط من قيمتين ممكنتين. وينسحب هذا القول على السبين الشاقولي أيضاً. وسأسمي قيمتي السبين الأفقي القيمتين اليمنى واليسرى، وقيمتي السبين الشاقولي القيمتين العليا والسفلى.

يمكن لعلماء الفيزياء قياس كل من السبينين الأفقي والشاقولي للإلكترونات بدقة وسهولة باستخدام تقنيات متاحة في الوقت الحالي. وتعمل آلات قياس سبين الإلكترونات على تغيير اتجاه حركة الإلكترون، الداخل ضمن الآلة، بحسب قيمة مركبة سبينه المقيسة. وبهذا الأسلوب، يمكن ببساطة تحديد قيمة هذا السبين بعدئذ بقياس موضع الإلكترون. وسنسمي آلات القياس هذه هنا صناديق أفقية وصناديق شاقولية.

يوجد بخصوص الإلكترونات حقيقة واقعية هي أنه عادة لا توجد علاقات بين قيم السبين الأفقي وقيم السبين الشاقولي. فمن ضمن أي مجموعة كبيرة من الإلكترونات اليمينية السبين الداخلة في فتحة الدخول لصندوق شاقولي، سيخرج نصف عددها بالضبط (إحصائياً) من الفتحة العليا والنصف الآخر من الفتحة السفلى. وينطبق الكلام نفسه على الإلكترونات اليسارية السبين التي ترد على فتحة الدخول لصندوق شاقولي وعلى الإلكترونات ذات السبين «العلوي» والسبين «السفلي» التي تدخل في صناديق أفقية.

وهناك حقيقة تجريبية أخرى بخصوص الإلكترونات، ومهمة جداً في هذا الصدد، هي أن قياس السبين الأفقي للإلكترون يمكن أن يسبب الفوضى في قيمة سبينه الشاقولي بأسلوب لا يمكن التحكم فيه، والعكس بالعكس. فمثلاً، إذا أجرى أحدٌ قياسات السبينات الشاقولية لأي مجموعة كبيرة من الإلكترونات بين قياسين متواليين لسبيناتها الأفقية [انظر الشكل في الصفحة التالية] فالذي يحدث دائماً هو أن عملية قياس السبين الشاقولي تغير قيم السبين الأفقي لنصف عدد الإلكترونات المارة بين القياسين، في حين تظل قيم السبين الأفقي للنصف الآخر من دون تغيير.

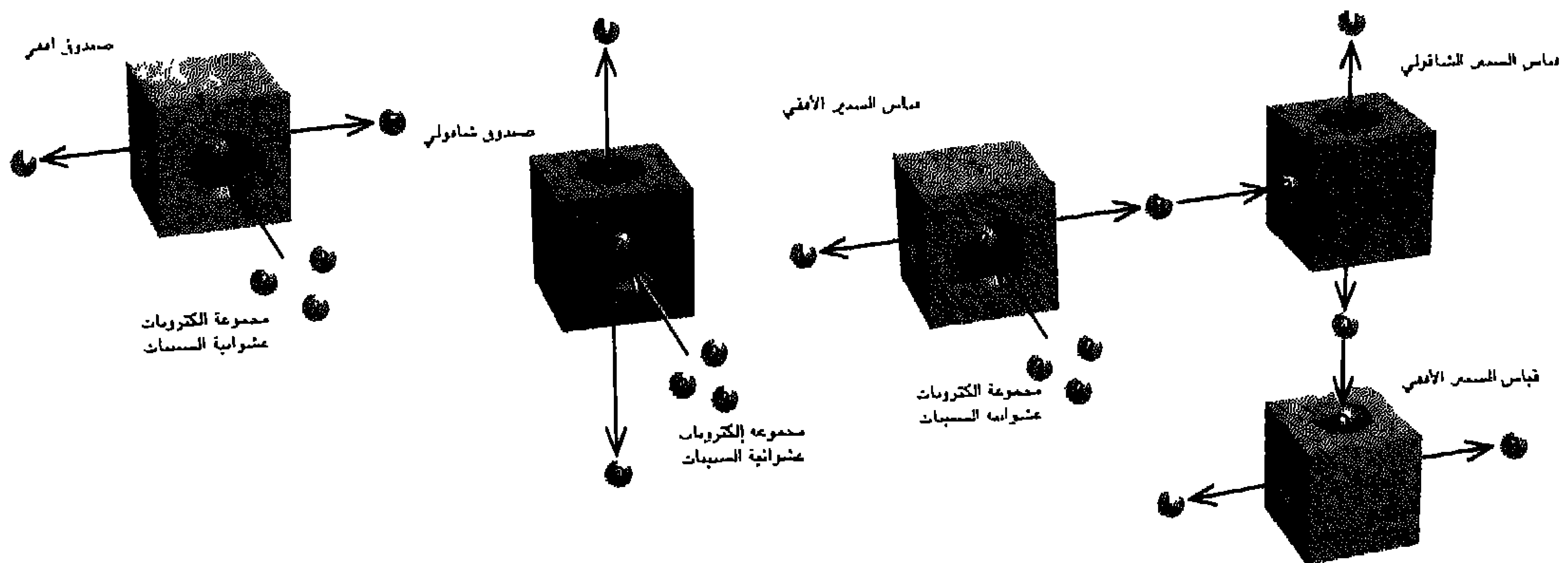
لم يتمكن أحد قط من تصميم قياس للسبين الشاقولي بحيث يتجنب حدوث مثل هذه الانقسامات. كما لم يتمكن أحد قط من تحديد أي خواص فيزيائية لأفراد الإلكترونات، في مثل هذه المجموعات، تُحدِّد هوية الإلكترونات التي تغير سبينها الأفقي خلال عملية قياس سبينها الشاقولي. وهوية تلك التي لا تفعل ذلك.

إن العقيدة السائدة حول هذه الأمور تقول بأنه لا يمكن مبدئياً أن يكون لمثل هذا القياس للسبين الشاقولي إلا هذا التأثير بالضبط في قياسات السبين الأفقي. زد على ذلك أن الاعتقاد السائد يستلزم أن تكون الصدفة، والصدفة فقط، هي التي تحدد هوية الإلكترونات التي يتغير سبينها الأفقي نتيجة لقياس سبينها الشاقولي، والأخرى التي لا يتغير سبينها الأفقي نتيجه لهذا القياس؛ أي بعبارة أخرى: إن القوانين التي تحكم هذه التغيرات هي بكل بساطة قوانين غير حتمية. ومن المؤكد أن هذه الاستنتاجات تبدو بريئة ومعقولة في ضوء البيانات التجريبية.

إذا كان قياس أحد نوعي السبين يؤدي دوماً إلى فوضى، لا يمكن التحكم فيها، في قيمة النوع الآخر، فلن توجد أي طريقة للتحقق من قيم كل من السبين الأفقي والسبين الشاقولي لإلكترون ما عند أي لحظة معينة. وهذه الظاهرة هي نموذج (لمبدأ الارتياب) Uncertainty Principle. فبموجب هذا المبدأ يقال عن زوجين من الخواص الفيزيائية القابلة للقياس، كالموضع والاندفاع، أو ــ كما فــي حالتنا الراهنة ــ السبين الأفقي والسبين الشاقولي ، إنهما غير متوافقين؛ أي إن قياسات أحدهما تؤثر فوضوياً في الآخر، وتوجد أمثلة عديدة أخرى معروفة عن أزواج الخواص الفيزيائية غير المتوافقة.

يكفي هذا عن اللاحتمية. ولكن مازال هناك خواص أخرى للجسيمات الذرية تثير الحيرة ويتطلب اكتشافها تجربة أكثر تعقيداً. دعنا نتخيل صندوقاً يقيس السبين الشاقولي للإلكترونات. تخرج الإلكترونات ذات السبين العلوي من الصندوق على المسار المكتوب عليه «أعلى». وتخرج الإلكترونات ذات السبين السفلي من المسار المكتوب عليه «أسفل». يمكن إذاً إعداد جدارين عاكسين لجعل المسارين يلتقيان عند نقطة أخرى. ويمكن تصميم هذين السطحين بحيث لا تتغير الخصائص السبينية للإلكترونات بأي طريقة. نضع عند النقطة التي يتقاطع فيها المساران «صندوقاً أسود» ينضم فيه المساران ويصبحان مساراً واحداً، ويحدث ذلك أيضاً من دون تغير في قيم السبين.

نفرض الآن أننا نُدخل مجموعة كبيرة من الإلكترونات اليمينية السبين، واحداً فواحداً، في الصندوق الشاقولي. تتحرك الإلكترونات في المسارات نحو الصندوق الأسود. وعندما تخرج من فتحة الصندوق الأسود نقيس سبينها الأفقي، فما النتائج التي نتوقعها؟ إن الخبرة السابقة تدل على أن نصف مثل هذه الإلكترونات (إحصائياً) ستكون ذات سبين علوي وستتجه خلال الجهاز نحو الفتحة العليا، وسيكون النصف الآخر سفلي السبين وسيأخذ المسار إلى أسفل. لندرس الآن النصف الأول. لا يمكن لأي شيء يقع على المسارات بين الصندوق الشاقولي ونقطة الخروج أن يؤثر في قيم السبين الشاقولي للإلكترونات. وعلى ذلك، ستخرج جميعها من الجهاز وهي إلكترونات علوية السبين . وطبقاً للبيانات التي سبق الحصول



يتغير سلوك السبين في متوالية من ثلاثة قياسات. تقاس الإلكترونات، واحداً بعد الآخر، على صعيد سبينها الأفقي (في اليسار) ثم على صعيد سبينها الشاقولي (في اليمين)، ومرة أخرى على صعيد سبينها الأفقي (في الأسفل). يعدل الصندوق الشاقولي سبين نصف هذه الإلكترونات وبالتالي يخرج هذا النصف من الصندوق الأفقي الثاني بسبين يميني والنصف الآخر بسبين يساري. إن صناديق قياس السبين تغير اتجاه حركة الإلكترونات تبعاً لقيم سبين الجسيمات. يرسل «الصندوق الأفقي» الإلكترونات اليسارية السبين نحو اليسار، في حين تذهب الإلكترونات اليمينية السبين نحو اليمين (في اليسار). يرسل «الصندوق الشاقولي» الإلكترونات ذات السبين العلوي نحو الأعلى وذات السبين السفلي نحو الأسفل (في اليمين).

عليها، سيكون نصف عدد الإلكترونات يميني السبين والنصف الآخر يساري السبين. وسيكون للنصف الثاني. أي للإلكترونات السفلية السبين، الخصائص نفسها ــ إحصائياً ــ فيما يخص السبين الأفقي. وبتجميع كل هذه التوقعات. ينتج أن نصف أي مجموعة كبيرة من الإلكترونات اليمينية السبين، التي تدخل في هذا الجهاز، ستكون في النهاية يمينية السبين، في حين سيكون النصف الآخر يساري السبين.

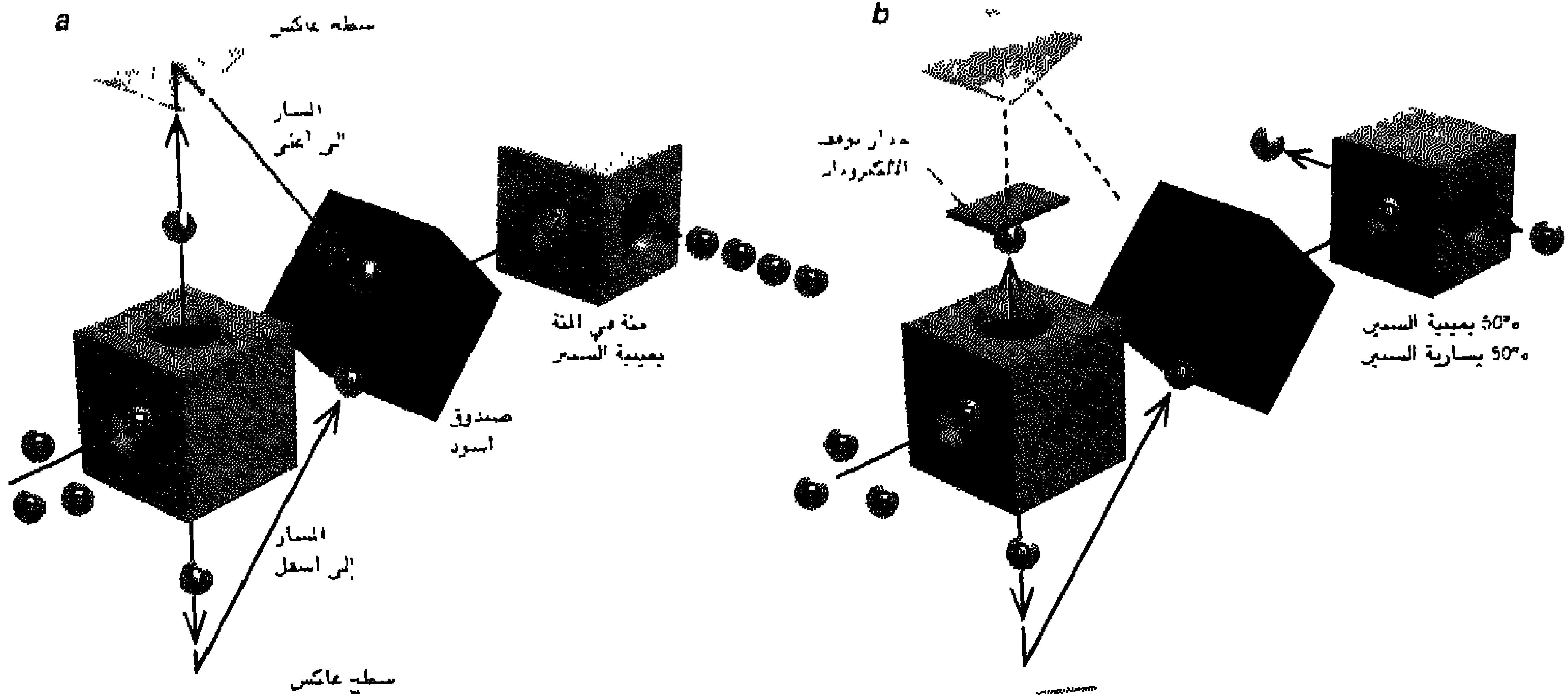
إن هذه الاستنتاجات تبدو روتينية تماماً ولا جديد فيها. ولكن شيئاً غريباً يحدث عند محاولة إجراء التجربة فعلياً: إن جميع الإلكترونات اليمينية السبين التي تدخل في هذا الجهاز، واحداً فواحداً، تخرج في البداية وهي يمينية السبين.

وليس من المبالغة وصف هذه النتيجة بأنها واحدة من أغرب النتائج في الفيزياء الحديثة. وربما تتضح الأمور إذا عُدلت التجربة بعض الشيء. نفرض أننا تمكنا من تزويد الجهاز بجدار صغير متحرك ومُوقف للإلكترونات يمكن دسُه حسب الرغبة لداخل الفتحة العليا أو خارجها (مثلاً) (انظر الشكل في الصفحة التالية). عندما يكون الجدار في الداخل ستوقف جميع الإلكترونات التي تتحرك على المسار نحو الأعلى، ولا يصل إلى الصندوق الأسود سوى الإلكترونات التي تتحرك على المسار نحو الأسفل.

ما الذي يتوقع حدوثه عند إدخال الجدار؟ أولاً: إن الإلكترونات التي تمر من فتحة الصندوق الأسود يجب أن يقل عددها إلى النصف، لأن أحد المسارين مسدود. وماذا عن إحصائية السبين الأفقي للنصف الباقي؟ عندما كان الجدار في الخارج كانت جميع الإلكترونـــات اليمينيـــة السبين التي دخلت في البداية قد انتهت إلى إلكترونات يمينية السبين. أي إن جميع هذه الإلكترونات بقيت في النهاية يمينية السبين سواء سلكت المسار نحو الأعلى أو نحو الأسفل وعلى ذلك، وبما أن وجود الجدار، أو عدمه، في الطريق إلى أعلى لا يمكن أن يؤثر في الإلكترونات التي تسير نحو الأسفل، فإن النصف الباقي من الإلكترونات يجب أن يكون يميني السبين.

لكن الذي يحدث فعلاً، كما يمكن للقارئ أن يتوقع، هو أن التجربة تناقض توقعاتنا هذه. صحيح إن عدد الإلكترونات ينقص فعلاً إلى النصف، كما توقعنا، ولكن النصف الباقي من الإلكترونات ليس كله يميني السبين؛ بل إن نصفها فقط يميني السبين والنصف الآخر يساري السبين. ويحدث الشيء نفسه إذا أدخلنا جداراً في المسار نحو الأسفل بدلاً من المسار نحو الأعلى. (القراء الذين لهم بعض الدراية بميكانيك الكم قد يرون في هذه التجربة صورة منطقية بسيطة لتجربة الشقين Double-Slit Experiment.

كيف يمكن فهم التعارض بين نتائج هذه التجارب وبين توقعاتنا بخصوصها؟ دعنا ندرس حالة إلكترون يمر خلال الجهاز عندما يكون الجدار في الخارج. ما الطرق التي يمكن أن يسلكها الإلكترون؟ هل يمكن أن يكون قد أخذ المسار إلى أسفل؟ من الواضح أن الإجابة عن السؤال هي بالنفي، لأن نصف الإلكترونات التي تأخذ هذا المسار إحصائياً (كما ظهر من التجربة المعدلة بوجود الجدار) ستكون إلكترونات ذات سبين أفقي، في حين أنه من المؤكد أن كل إلكترون يمر خلال الجهاز من دون الجدار يكون يميني السبين عند فتحة الخروج من الجهاز. هل يمكن أن يكون الإلكترون قد أخذ الطريق إلى أعلى؟ إن الإجابة هي بالنفي، للأسباب نفسها.



يوضح جهاز المسارين السلوك غير المألوف لسبين الإلكترونات. في المجموعة a تدخل إلكترونات يمينية السبين في صندوق شاقولي وترسل إما على المسار العلوي أو على المسار السفلي. تسبب السطوح العاكسة تقارب المسارين عند «صندوق أسود» وبعد ذلك نجد أن جميع الإلكترونات يمينية السبين. وفي المجموعة b، يسد جدار أحد المسارين، وبالتالي يسير نصف الإلكترونات فقط إلى النهاية. ونصف هذه الإلكترونات يكون يساري السبين ونصفها الآخر يكون يميني السبين.

هل يمكن أن يكون الإلكترون قد سلك الطريقين بشكل ما؟ الإجابة هي: بالنفي. ولتوضيح ذلك نفترض أننا أوقفنا التجربة عند مرور أحد الإلكترونات في الجهاز وبحثنا عن مكانه عندئذ. ينتج مما سبق أن الإلكترون يوجد في المسار إلى أعلى في نصف الوقت وعندئذ لا نرى أي شيء على المسار إلى أسفل، وفي النصف الثاني من الوقت يوجد الإلكترون في المسار إلى أسفل ولا نلاحظ أي شيء على المسار إلى أعلى. هل يمكن ألا يكون قد سلك أياً من المسارين؟ بالطبع لا. إذا وُضع جدار في كل من الطريقين فلن يتمكن أي شيء على الإطلاق من المرور.

يبدو حقاً أن أمراً مثيراً للغاية قد حدث، والواقع إن هذا صحيح ـــ على الأقل بموجب ما أصبح أحد الأساسيات المركزية للفيزياء النظرية خلال الخمسين عاماً الماضية، (وهي العقيدة الثانية من العقائد الرسمية الثلاث التي ألمحت إليها في الفقرة الافتتاحية، أي عدم إمكانية تحديد الموضع). وطبقاً لهذه العقيدة، لا تترك نتائج هذه التجربة بديلاً من الإقرار بأن التساؤل عن خط سير مثل هذا الإلكترون خلال مثل هذا الجهاز الذي ابتدعناه هو تساؤل لا معنى له على الإطلاق، والمفروض أن التساؤل عن أي مسار يأخذه مثل هذا الإلكترون هو مثل التساؤل، مثلاً، عن الانتماء السياسي لشطيرة سمك أو عن الحالة الاجتماعية للعدد 5. والفكرة هي أن طرح مثل هذه الأسئلة يرقى إلى سوء تطبيق اللغة وهو ما يسميه الفلاسفة (خطأ مقولياً) Category Mistake.

وبالتالي فإن ما تذكره مراجع الفيزياء عن مثل هذه الإلكترونات ليس قطعاً أن هذه الجسيمات تأخذ المسار إلى أعلى أو المسار إلى أسفل أو المسارين معاً أو لا تأخذ أياً منهما خلال الجهاز. بل لا توجد أي حقيقة عن المسار الذي تسلكه ـــ لا مجرد حقيقة غير معلومة، بل لا حقيقة على الإطلاق. إن الجسيمات موجودة فيما تسميه هذه الكتب (تراكب) Superposition سلوك المسارين معاً، إلى أعلى وإلى أسفل، خلال الجهاز.

وبالرغم من القلق العميق الذي تسببه هذه الأفكار في الصورة الحدسية التي نرسمها لهذا العالم وفي الخبرة الفعلية بما هو مادي، وبماهية الجسيم، فقد «طُبخت» مجموعة متماسكة من القواعد التي نجحت نجاحاً باهراً في التنبؤ بجميع سلوكيات الإلكترونات التي تُشاهد تحت هذه الظروف. إضافة إلى ذلك، فإن هذه القواعد ـــ التي تعرف طبعاً بميكانيك الكم ـــ قد نجحت نجاحاً منقطع النظير في التنبؤ بجميع السلوكيات الملحوظة لجميع المنظومات الفيزيائية وفي جميع الظروف. والواقع إن ميكانيك الكم كان خلال أكثر من سبعين عاماً الإطار الذي تنشط فيه كل الفيزياء النظرية.

تُمثل حالات المنظومات الفيزيائية رياضياتياً في ميكانيك الكم بما يسمى الدالة (التابع) الموجية. وفي الحالة البسيطة لمنظومة مؤلفة من جسيم واحد، كالحالة التي كنت أناقشها، تأخذ دالة الموجة في ميكانيك الكم صورة دالة مباشرة للموضع. فالدالة الموجية لجسيم موجود في منطقة ما A، مثلاً، لا بد أن تكون معدومة في كل موضع من الفضاء إلا في A، وستكون لها قيمة غير معدومة

مؤسس ميكانيك كمٍّ جديد وشجاع

ولد ديفيد جوزيف بوم سنة 1917 في ويلكس ــ بار بولاية كاليفورنيا. وبعد أن أنهى دراسة الفيزياء في كلية ولاية بنسلفانيا، تابع دراساته العليا في جامعة كاليفورنيا ببيركلي. وقد بحث في بيركلي، خلال الحرب العالمية الثانية، في تبعثر الجسيمات النووية تحت إشراف (ج.ر. أوبنهايمر). وبعد حصوله على الدكتوراه من بيركلي، عمل بوم أستاذاً مساعداً بجامعة برنستون.

وخلال تلك السنوات، ألف بوم كتاب نظرية الكم، الذي يعتبر الآن دفاعاً كلاسيكياً عن تفسير كوبنهاكن. ومع ذلك ازدادت، في الوقت نفسه، حدة شكوك بوم في صحة هذا التفسير.

وفي ذلك الوقت أجبرت جامعة برنستون بوم على ترك وظيفته في هيئة تدريسها. وقد دعي بوم إلى المثول أمام لجنة الكونغرس للنشاط المضاد لأمريكا وذلك في المرحلة المكارثية. وكان ذلك مرتبطاً بالادعاءات التي لا تستند إلى أي أساس على الإطلاق والتي تقول بأنه وبعض زملائه السابقين في مختبر الإشعاع ببيركلي متعاطفون مع الشيوعيين (كان أوبنهايمر، خلال الحرب العالمية الثانية، قد أخطر مكتب المباحث الفيدرالية بأسماء الذين يظن أنهم عملاء شيوعيون من بين أصدقائه ومعارفه. ويبدو أن بوم كان من بين المتهمين). وبسبب كونه مؤمناً إيماناً حماسياً بالحرية، فقد رفض بوم أن يتقدم للشهادة أمام اللجنة، كمسألة مبدأ. وكنتيجة لذلك قررت اللجنة أنه أهان الكونغرس.

وقد كانت هذه الحادثة كارثة بالنسبة لعمل بوم في الولايات المتحدة الأمريكية. فقد رفضت جامعة برنستون تجديد عقده وطلبت إليه ألا تطأ قدماه أرض الجامعة. ولتعذر حصوله على وظيفة في أي جامعة أخرى، ترك بوم الولايات المتحدة عام 1951 ليشغل وظيفة في جامعة سان باولو في البرازيل. وهناك طلب إليه المسؤولون الأمريكيون تسليم جواز سفره، مما يعني في الواقع تجريده من جنسيته الأمريكية.

وبعد قيامه بالتدريس في البرازيل ذهب بوم إلى معهد تكنيون في فلسطين وإلى جامعة بريستول في إنكلترا. وبالرغم من أنه برئ من تهمة إهانة الكونغرس فيما بعد وسُمح له بالعودة ثانية إلى الولايات المتحدة، فقد قرر بوم عام 1961 أن يستقر بصفة دائمة في كلية بركبك بلندن.

إلى جانب تفسيره لميكانيك الكم، قدم بوم إضافات في فروع مختلفة من الفيزياء. فقد أجرى بحوثاً في البلازما والمعادن والهيليوم السائل. وقد اكتشف، هو وتلميذه (ي. أهارونوف)، ما يسمى الآن مفعول أهارونوف ــ بوم. فقد برهنا على أن ميكانيك الكم يتنبأ بأن حركات الجسيمات المشحونة يمكن أن تتأثر بوجود الحقول المغنطيسية حتى لو لم تدخل هذه الجسيمات البتة إلى المناطق التي تقتصر عليها هذه الحقول. وقد أيدت التجارب التي أجريت فيما بعد هذا التأثير تماماً [انظر: *«التداخل الكمومي ومفعول أهارونوف ــ بوم» مجلة العلوم، العدد 2 (1990)، ص82*].

وفي مرحلة تالية من حياته، أخذ بوم يهتم بالمشكلات الفلسفية الأعم. وقد نجح في تنمية صورة للكون كترابط متشابك من جميع الأشياء، وهي فكرة أطلق عليها اسم «النظام المترابط» Implicate Order. وقد ألف بوم عدة كتب في الفيزياء والفلسفة وطبيعة الوعي. وكان يتعاون في تأليف كتاب آخر عن ميكانيك الكم عندما توفي نتيجة لإصابته بأزمة قلبية عام 1992. ويتذكره أصدقاؤه وزملاؤه ليس فقط كإنسان متألق وجريء وإنما أيضاً كإنسان شريف وكريم ولطيف للغاية.

في A. وكذلك الدالة الموجية لجسيم موجود في منطقة B، فهي تتلاشى في كل موضع من الفضاء إلا في B وستأخذ قيمة غير معدومة في B. والدالة الموجية لجسيم موجود في تراكب للمنطقتين A وB ستأخذ قيماً غير معدومة في كل من هاتين المنطقتين وتكون صفراً في جميع المناطق الأخرى. ومثال ذلك إلكترون مرّ ــ من فوره (لتوّه) ــ خلال صندوق شاقولي وكان في البداية يميني السبين.

إن إحدى القواعد الرئيسية في ميكانيك الكم (القاعدة التي تستهدفها بالهدم نظرية بوم بصراحة) تقول: إن تمثيل الأشياء الفيزيائية بدوال موجية هو تمثيل تام لها. أي إن قراءة الدالة الموجية توفر ــ بموجب ميكانيك الكم ــ كل ما يمكن قوله عن المنظومة الفيزيائية في أي لحظة.

إن ما تهتم به قوانين الفيزياء ــ وفي واقع الأمر، كل ما يمكن أن تعنيه هذه القوانين طبقاً لميكانيك الكم ــ هو كيف تتطور، مع الزمن، الدوال الموجية للمنظومات الفيزيائية المدروسة. وتشير المراجع المألوفة في ميكانيك الكم إلى صنفين من هذه القوانين. والأمر الغريب للغاية حول هذه الصياغة هو أن أحد هذين الصنفين من القوانين ينطبق عندما تكون المنظومة الفيزيائية المعينة غير مرصودة مباشرة، وينطبق الصنف الثاني من هذه القوانين عندما تكون المنظومات الفيزيائية مرصودة.

تكتب القوانين في الصنف الأول عادة على صورة «معادلات حركة» وهي معادلات تفاضلية خطية. وهذه المعادلات مصممة لوصف حالات مثل حالة دخول إلكترون يميني السبين بداية في صندوق شاقولي فيخرج منه كتراكب حركتين: إحداهما نحو الأعلى والأخرى نحو الأسفل. زد على ذلك أن كل ما هو معلوم تجريبياً يشير إلى أن هذه القوانين تحكم تطور الدوال الموجية لكل منظومة فيزيائية مجهرية واحدة معزولة في جميع الحالات. وهكذا، وبما أن المنظومات المجهرية هي مكونات كل شيء موجود، يبدو أن هناك ــ في ضوء ذلك ــ سبباً وجيهاً لافتراض أن هذه المعادلات التفاضلية الخطية هي المعادلات الفعلية للحركة في عالم الفيزياء كله.

ومع ذلك لا يمكن أن يكون هذا الاستنتاج صحيحاً تماماً إذا كانت الدوال الموجية تمثل بالفعل وصفاً كاملاً للمنظومات الفيزيائية، كما يدّعي ميكانيك الكم. فالقوانين التي تعبر عنها هذه

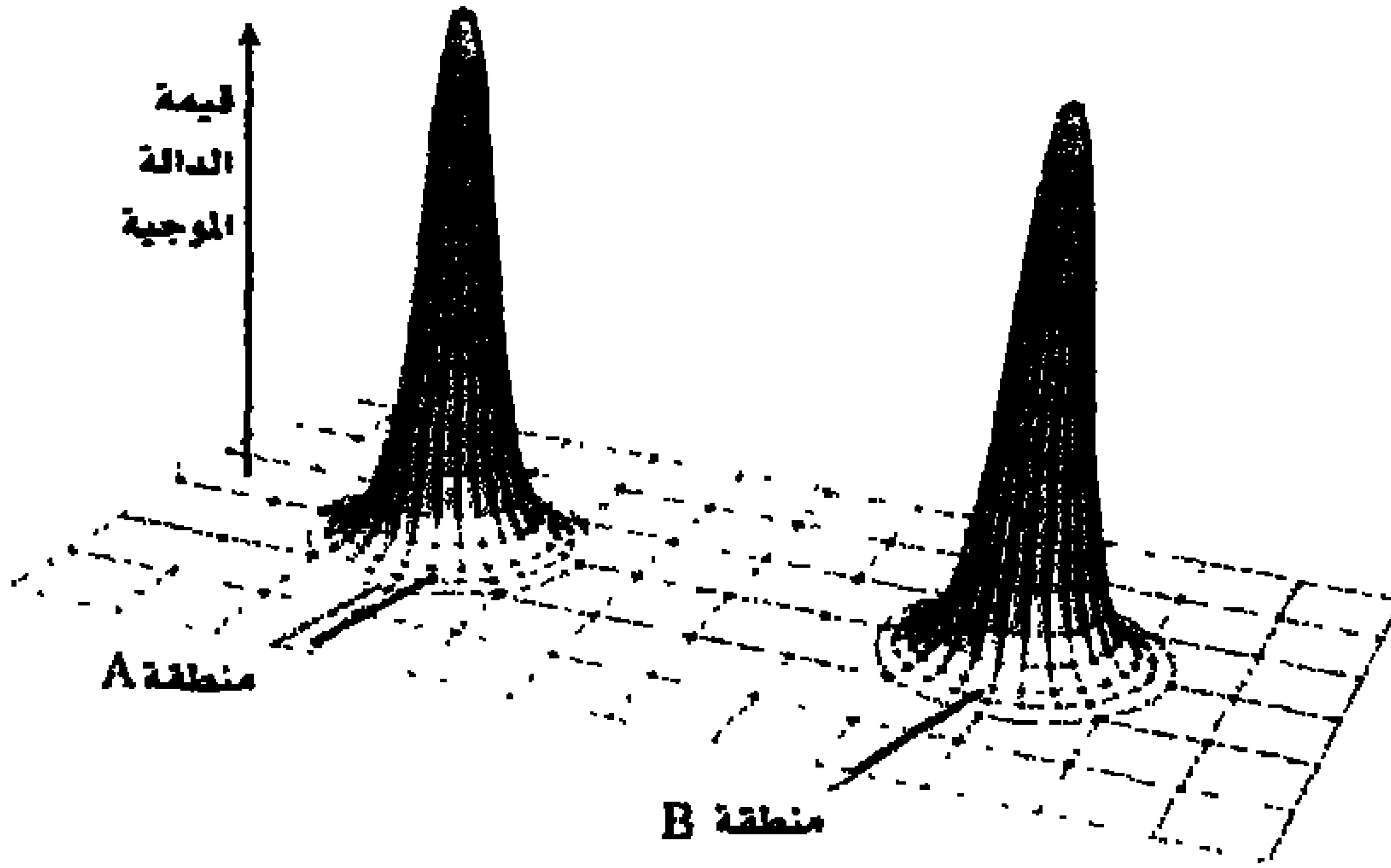
المعادلات قوانين حتمية تماماً قبل كل شيء، في حين يبدو أن عنصراً من المصادفة البحتة يؤدي دوراً في نتائج التجارب، تجارب صناديق السبين مثلاً.

دعنا ننظر في نتائج قياس موضع إلكترون كان في البداية في تراكب لوجوده في كل من المنطقتين A، B. تبين الحسابات المباشرة أن المعادلات التفاضلية للحركة تتنبئ بنتيجة محددة لنهاية عملية القياس هذه. ولكن هذه المعادلات لا تتنبأ بأن جهاز القياس سيدل على أن الإلكترون كان موجوداً في المنطقة A أو في المنطقة B (وهو ما يحدث عندما تقوم فعلاً بإجراء قياس كهذا). بل إن هذه المعادلات تقول بالأحرى بأن جهاز القياس من شأنه أن يقود بالتأكيد إلى تراكب ما يشير إلى أن الإلكترون قد وجد في المنطقة A، وإلى أنه قد وجد في المنطقة B. ويمكن التعبير عن ذلك بأسلوب مختلف قليلاً عن ذلك، كالآتي: هذه المعادلات تتنبأ بأن جهاز القياس سيوجد في النهاية في حالة فيزيائية لا تتضمن، بكل بساطة، أي حقيقة بخصوص ما تشير إليه. ولسنا في حاجة بالطبع إلى ذكر أن مثل هذه التراكبات (مهما كانت هويتها بالضبط) لا تصف، بدقة، الكيفية التي تنتهي إليها الأمور عندما تُجرى هذه القياسات فعلاً.

نتيجة لذلك، وطبقاً للتفكير السائد، لابد من ردف الصنف الأول من القوانين بصنف ثان سيكون صنفاً احتمالياً صريحاً. فهذا الصنف يتطلب مثلاً، إذا كان المقصود قياس موضوع إلكترون كان في البداية في موضع تراكبي لوجوده في المنطقة A وفي المنقطة B، أن يكون احتمال وجوده في A مساوياً 50% واحتمال وجوده في B مساوياً 50%. وبعبارة أخرى إذا قيس موضع الإلكترون ستكون هناك فرصة نسبتها 50 في المئة لأن تتغير الدالة الموجية للإلكترون أثناء إجراء القياس إلى دالة صفرية القيمة في كل مكان إلا في المنطقة A. وإلى فرصة نسبتها 50 في المئة لأن تتغير الدالة الموجية إلى أخرى صفرية القيمة في كل مكان إلا في المنطقة B. (يسمى هذا التغير أحياناً «تقلص» Collapse الدالة الموجية).

كيف يمكن التمييز بين الحالات التي يطبق فيها الصنف الأول من القوانين وبين الحالات الأخرى التي يطبق فيها الصنف الثاني؟ إن كل ما كان باستطاعة جميع واضعي أسس ميكانيك الكم أن يقولوه هو أن لذلك علاقة بالتمييز بين «القياس» و«عملية فيزيائية عادية» أو بين الراصد والمرصود، أو بين الذاتي والموضوعي.

كان كثير من الفيزيائيين والفلاسفة يعتقدون، زمناً طويلاً، أن هذه الأحوال غير مرضية على الإطلاق. وقد بدا منافياً للعقل أن تعتمد أفضل صياغة متاحة لأهم القوانين الأساسية للطبيعة على مثل هذه التمييزات المراوغة والمفتقرة للدقة. وأصبح التحدي، إما للتخلص من هذا الغموض وإما لإصلاحه، يبرز في السنين الثلاثين الماضية كمهمة رئيسية في استيضاح أسس ميكانيك الكم. وقد ظهر



تأخذ الدوال الموجية للجسيمات قيماً لا صفرية في المناطق الفضائية التي يمكن لجهاز قياس الموضع أن يعثر على الجسيم فيها. وفي العقيدة السائدة تؤدي عملية الرصد إلى تقلص الدالة الموجية ضمن المنطقة A، أو ضمن المنطقة B.

ذلك تحت عدة أسماء: مشكلة قطة شرودنكر، مثلاً، أو مشكلة (صديق فكنر) Wigner's Friend أو مشكلة (اختصار الحالة الكمية) State-Reduction Quantum، وسأشير إليها بالاسم المعاصر والمألوف: مشكلة القياس.

لقد وجد عالم الفيزياء الأمريكي المولد (د.ج. بوم) حلاً مدهشاً. كان عالم الفيزياء الفرنسي (ل. دوبروي) قد وضع قبل عدة سنوات أسلوباً لحل المشكلة، ولكن صياغة دوبروي كانت أقل عمومية وأضعف بكثير من الصياغة التي وضعها بوم. ومنذ فترة غير بعيدة أعاد عالم الفيزياء الأمريكي الراحل (ج. بل) صياغة نظرية بوم الأصلية في شكل بسيط وجذاب جداً.

وللتغلب على كل ما ذكر سابقاً من حجج، تُعتبر نظرية بوم الجسيمات بأنها أشياء توجد دوماً في مكان ما أو آخر محدد. إضافة إلى ذلك فإن نظرية بوم تعطي تفسيراً أوضح بكثير من تفسير كوبنهاكن عن مكونات الكون. إن الدوال الموجية في نظرية بوم ليست مجرد أشياء رياضياتية، وإنما أشياء فيزيائية. ويتعامل بوم مع الدوال الموجية بطريقة تشبه بعض الشيء طريقة التعامل مع حقول القوى التقليدية، كالحقل التثاقلي والحقل المغنطيسي. وما تؤديه الدوال الموجية في نظرية بوم (تماماً مثل ما تؤديه حقول القوى التقليدية) هو في الواقع تحريك الجسيمات بحيث توجهها، كما كانت الحال من قبل، نحو مساراتها الفعلية.

إن القوانين التي تحكم تطور الدوال الموجية بمرور الزمن هي بالضبط معادلات ميكانيك الكم التفاضلية الخطية للحركة، ولكن هذه المرة من دون أي حالات خاصة على الإطلاق. وتوجد أيضاً في نظرية بوم قوانين أخرى تحدد كيف تحرك الدوال الموجية الجسيمات الموكلة إليها. وجميع هذه القوانين حتمية تماماً. وبالتالي يمكن حساب مواضع جميع الجسيمات في العالم في أي وقت، وكذلك حساب دالة الكم الموجية للعالم بأكمله في ذلك الوقت بيقين،

الصياغة الرياضياتية الدقيقة لنظرية بوم

تتكون نظرية بوم في مجملها من ثلاثة عناصر. أول هذه العناصر هو قانون حتمي (وهو معادلة شرودنگر) يصف كيف تتطور الدوال الموجية للمنظومات الفيزيائية مع الزمن وهذا القانون هو:

$$i\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}\psi(x_1\ldots x_{3N},t) = H\psi(x_1\ldots x_{3N},t)$$

حيث i هو العدد التخيلي $\sqrt{-1}$، h هو ثابت بلانك، ψ هي الدالة الموجية، H هو كائن رياضياتي يسمى المؤثر الهاميلتوني، N هو عدد جسيمات المنظومة، $X_1 \ldots X_{3N}$ تمثل الإحداثيات المكانية لهذه الجسيمات، t الزمن. ويمكننا أن نقول تبسيطا إن المؤثر الهاميلتوني يمثل طاقة المنظومة.

العنصر الثاني هو قانون حتمي لحركة الجسيمات:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \frac{j_i(X_1\ldots X_{3N},t)}{|\psi(X_1\ldots X_{3N},t)|^2}$$

حيث $X_1 \ldots X_{3N}$ تمثل القيم الفعلية للإحداثيات، $dXi(t)/dt$ هو سرعة تغير X_i في اللحظة t، j_i يمثل مركبات التيار الاحتمالي الكمومي العادي standard quantum - mechanical probability current، والرمز السفلي i يقع بين 1 و $3N$.

والعنصر الثالث هو قاعدة إحصائية تشبه قاعدة أخرى تستخدم في الميكانيك الإحصائي التقليدي، وهي تبين بدقة أسلوب أخذ المتوسط عندما تكون الحالات المضبوطة للمنظومات الفيزيائية مجهولة. وصيغة هذه القاعدة هي كما يلي: افرض أننا أُعطينا الدالة الموجية لمنظومة معينة وليس لدينا معلومات عن مواضع جسيماتها. إن الذي يجب علينا افتراضه لحساب حركة هذه الجسيمات مستقبلا، هو أن احتمال كون هذه الجسيمات موجودة حاليا في وضع ما $(X_1 \ldots X_{3N})$ يساوي $|\psi(X_1 \ldots X_{3N})|^2$، وإذا عُرفت مواضع الجسيمات في وقت لاحق (مثلا أثناء عملية قياس)، فإن القاعدة تبين أنه يجب استخدام هذه المعلومة لتحديث الاحتمالات باستخدام أسلوب رياضياتي يسمى التكييف المباشر straightforward conditionalization.

هذا، ببساطة، هو كل ما تتضمنه نظرية بوم. وأي شيء آخر نعرفه عنها ــ مثلا كل ما قدم في هذا المقال ــ ينتج بكل دقة من هذه العناصر الثلاثة.

باستخدام معرفة مواضع جميع الجسيمات في الكون ودالة الكم الموجية للعالم بأكمله في أي وقت سابق.

وإن أي عجز، في هذه النظرية، عن إجراء هذه الحسابات، أو أي ارتياب في نتائجها هو بالضرورة ارتياب إدراكي ناشئ عن عدم الحصول على المعلومات أو عن الشك فيها. ينتج ذلك من الجهل وليس من العمليات على عنصر مصادفة يتعذر التعامل معه واختصاره في القوانين الأساسية للعالم. ومع ذلك، فإن هذه النظرية تتضمن، من ناحية المبدأ، أن بعض مثل هذا الجهل موجود لدينا. والواقع إن قوانين الحركة في نظرية بوم تفرض علينا هذا النوع من الجهل. وهذا الجهل يكفي بالضبط، ومن النوع المطلوب تماماً، للحصول على التنبؤات الإحصائية المعتادة في ميكانيك الكم. ويحدث ذلك عن طريق نوع من أخذ متوسط ما هو غير معلوم، وهو بالضبط نوع أخذ المتوسط الذي نقابله في الميكانيك الإحصائي التقليدي.

تصف النظرية عملية فيزيائية حقيقية وملموسة وحتمية ــ عملية يمكن تتبعها بدقة وبالتفصيل رياضياتياً ــ في حين لا يمكن تجنب تداخل عملية القياس مع ما يقاس. وبعبارة أخرى تفيد النظرية أن هذا الجهل ــ بالرغم من أنه مجرد جهل بحقائق محددة تماماً عن العالم ــ لا يمكن التخلص منه من دون انتهاك القانون الفيزيائي (أي من دون انتهاك واحد من قانوني الحركة، المشروحَيْن ضمن الإطار المبين في أعلى الصفحة، اللذين نستخلص منهما كل شيء آخر عن نظرية بوم).

يمكن لنظرية بوم أن تفسر تماماً نتائج تجارب جهاز المسارين، هذه التجارب التي تنطوي نتائجها على أن الإلكترونات قد توجد في حالات لا يتاح فيها تحديد مكانها. ففي حال إلكترون يدخل الجهاز وهو يميني السبين في البدء، ترى نظرية بوم أنه سيأخذ إما المسار إلى أعلى أو المسار إلى أسفل، ولا زيادة على ذلك. وتُحدد تماماً الشروط البدئية للجسيم، وعلى الخصوص دالته الموجية البدئية وموضعه البدئي، المسار الذي يأخذه من بين المسارين. ويستحيل، طبعاً، في بعض الحالات التأكد من بعض تفاصيل هذه الشروط عن طريق القياس. ولكن النقطة الأساسية هنا هي أن دالة الإلكترون الموجية سوف تنشق إلى فرعين، لتأخذ المسارين، سواء سلك الإلكترون هذا المسار أو ذاك. وسيكون هذا الانشقاق متفقاً مع المعادلات التفاضلية الخطية للحركة.

وعلى ذلك ففي حالة أخذ الإلكترون أحد المسارين، المسار إلى أعلى مثلاً، فإنه مع ذلك سيتحد ثانية عند الصندوق الأسود مع جزء دالته الموجية الذي أخذ المسار الآخر، أي المسار إلى أسفل. أما كيف يتوصل جزء الدالة الموجية، الذي ساق الإلكترون إلى سلوك المسار نحو الأسفل بعد اتحاد الجزأين، فيتعلق بالظروف الفيزيائية الموجودة على طول المسار إلى أسفل. ويمكن التعبير عن ذلك بأسلوب إيحائي بعض الشيء بالقول بأنه بمجرد اتحاد جزأي الدالة الموجية للإلكترون ثانية، فإن جزء الدالة الموجية الذي أخذ المسار المخالف للمسار الذي أخذه الإلكترون يمكنه «إعلام» الإلكترون عن الأحوال في هذا المسار. فمثلاً، إذا أُدخل جدار في المسار إلى أسفل، فإن مركبة الدالة الموجية التي اتجهت إلى أسفل لن تكون موجودة عند فتحة خروج الصندوق الأسود. وغياب هذا الجزء من الموجة يمكن أن يوفر معلومات أساسية. وبالتالي فإن الحركة التي يتحركها مثل هذا الإلكترون، حتى ولو كان قد أخذ المسار إلى أعلى، يمكن أن تعتمد اعتماداً أساسياً على ما إذا كان الجدار قد أدخل في الصندوق أم لا.

فضلاً عن ذلك، فإن نظرية بوم تؤدي إلى أن الجزء «الفارغ» من الدالة الموجية ــ أي الجزء الذي لا يسير في الطريق نفسه لسير الإلكترونات ــ لا يمكن كشفه على الإطلاق. فإحدى نتائج المعادلة الثانية في الإطار المبين في الصفحة التالية هي أن جزء الدالة الموجية ــ الذي يشغل الموضع نفسه الذي يشغله الجسيم فعلاً في لحظة ما ــ هو الذي يمكن أن يؤثر في حركة الجسيمات الأخرى. وعلى ذلك فإن الجزء الفارغ من الدالة الموجية، يكون عاجزاً تماماً عن ترك أي أثر يمكن رصده في أجهزة الكشف أو في أي شيء آخر، وذلك بالرغم من حقيقة وجوده فعلياً وفيزيائياً.

وعلى ذلك، فإن نظرية بوم تفسر جميع تفاصيل السلوكيات التي تبدو غريبة، والتي يتعذر فهمها، بخصوص الإلكترونات التي ناقشناها فيما سبق، وبكفاءة تعادل كفاءة التفسيرات القائمة. فضلاً عن ذلك، وهذه نقطة مهمة، لا تتضمن هذه النظرية أياً من التعقيدات الميتافيزيائية المصاحبة للتراكبات في ميكانيك الكم.

أما بخصوص مشكلة القياس فيمكن أن يقودنا النقاش إلى الاقتناع بأن نظرية بوم لا تعاني شيئاً من هذا القبيل. فنظرية بوم تنص على أن المعادلات التفاضلية الخطية للحركة تصف تطور الدالة الموجية للكون بأكمله ــ آلات القياس والراصدين وكل شيء ــ وصفاً حقيقياً كاملاً. ولكنها أيضاً تستلزم وجود حقائق محددة على الدوام حول أوضاع الجسيمات وبالتالي حول أوضاع مؤشرات آلات القياس، وحول أوضاع الإيونات في أدمغة المشاهدين الآدميين، وبالتالي حول نتائج التجارب.

بالرغم من جميع ميزات نظرية بوم المثيرة للإعجاب، فقد كان هناك إجماع عام تقريباً على رفض حتى مناقشتها وإجماع عام تقريباً على الانتماء والتأييد للصياغة المعتادة لميكانيك الكم. واستمر هذا الإجماع، المثير للدهشة، في الفيزياء خلال الجانب الأكبر من الأربعين سنة الماضية. وقد استمر رفض كثير من الباحثين لنظرية بوم على أساس أنها تمنح مواضع الجسيمات دوراً رياضياتياً متميزاً. وكانت الشكوى أن هذا الأسلوب التفضيلي يزيل التناظر بين الموضع والاندفاع، هذا التناظر الذي كان موجوداً في رياضيات ميكانيك الكم حتى ذلك الحين ــ وكأن زوال هذا التناظر يعتبر صفعة أخطر على الفكر العلمي من تقويض فكرة الحقيقة الفيزيائية الموضوعية، هذا التقويض الذي يسعى إليه تفسير كوبنهاكن. وقد رفض آخرون نظرية بوم لأنها لم تقدم تنبؤات تعتمد على التجربة فقط (يقصدون تنبؤات تجريبية واضحة) وتختلف عن تلك التي يقدمها التفسير المعتاد ــ كما لو كانت حقيقة التشابه الكبير بين الصياغتين بالنسبة لهذا الموضوع تجعلنا نفضل واحدة منهما على الأخرى. وإضافة إلى هؤلاء أشار غيرهم من الرافضين إلى «براهين» منشورة ــ وأهمها ما وضعه الرياضياتي الأمريكي (ج.ف. نويمان) وكلها كانت خاطئة ــ تدعي أن من المستحيل إبدال ميكانيك الكم بميكانيك حتمي من النوع الذي أتى به بوم.

ومن حسن الحظ الآن أن هذه المناقشات قد تم أغلبها في الماضي. وبالرغم من أنه من المحتمل أن يظل تفسير كوبنهاكن العقيدة المرشدة للفيزيائي المتوسط، فنادراً ما يدافع الآن المشتغلون الجادون بأساسيات ميكانيك الكم عن الصياغة المعتادة. ويوجد الآن عدد من الاقتراحات المثيرة للاهتمام لحل مشكلة القياس. (توجد مثلاً محاولات لإحياء فكرة تقلص الدالة الموجية التي أشرت إليها مسبقاً وصياغتها بلغة أكثر دقة). وسيكون الحكم في النهاية على نظرية بوم في ضوء هذه الاقتراحات وغيرها التي لم تكتشف بعد، وبالطبع في ضوء الحقائق التجريبية. وهيئة المحلفين في هذه القضية لم تظهر بعد.

ونظرية بوم هي الاقتراح الوحيد الجاد الآن الذي يتصف بأنه حتمي تماماً. وهي أيضاً الاقتراح الوحيد الذي ينكر وجود ما يسمى بالتراكبات حتى بالنسبة للمنظومات المجهرية. ولكنها بكل تأكيد لا تخلو من الانتهاكات لما يمكن تسميته بالحس الفيزيائي العام. وربما تكون أشد هذه الانتهاكات عنفاً هي **(اللاموضعية)** Nonlocality أي إن النظرية تتيح إمكانية أن يكون لشيء يحدث في المنطقة A تأثير فيزيائي آلي في المنطقة B [*انظر: «أسرع من الضوء» مجلة العلوم، العدد 2(1995)، صفحة 58*].

ولكن ربما تكون اللاموضعية شيئاً يجب أن نتعايش معه، شيئاً قد يصبح ببساطة إحدى حقائق الطبيعة. لأن الصياغة المعتادة لميكانيك الكم هي الأخرى لا موضعية؛ كما أن أغلب الحلول المقترحة لحل مشكلة القياس هي كذلك أيضاً. وتبعاً لرأي مشهور للعالم بل، فإن أي نظرية قادرة على إعطاء التنبؤات الإحصائية التي يعطيها ميكانيك الكم والمعروفة بصحتها، والتي تستجيب لبضعة افتراضات معقولة جداً بخصوص الطبيعة الفيزيائية للعالم، يجب أن تكون بالضرورة نظرية لا موضعية. والطرق الوحيدة التي تم تصورها لإنكار هذه الافتراضات، وبالتالي لتجنب اللاموضعية، هي تفسير ميكانيك الكم بنظرية «العوالم المتعددة» أو بنظرية «العقول المتعددة». وهذه التفسيرات تقول بأن جميع النتائج التجريبية الممكنة، لا تلك التي تحدث وحدها، تحدث فعلاً. لكن هذه الأفكار (قد تكون) أغرب من أن تؤخذ بعين الجد.

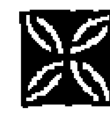
وقد أثار المشتغلون أيضاً أموراً أخرى تثير قلقهم. ما هو بالضبط الوضع الفلسفي للاحتمالات في نظرية بوم؟ هل يكفي أن تضمن النظرية لكل جسيم في هذا العالم موضعاً حتمياً في كل لحظة كي تصبح حقاً نظرية موثوقة عندما تؤكد أن كل قياس يمكن تصوره سوف يقود إلى نتيجة محددة، وأن كل ما نعتبره بالحدس

محدداً هو محدد فعلاً؟ إن هذه الأسئلة مازالت مطروحة على بساط البحث والمناقشة.

وأخيراً، وبمنتهى الأهمية، يجب أن أؤكد أن كل ما قيل في هذا المقام ينطبق، حالياً على الأقل، على المنظومات الفيزيائية اللانسبوية. أي إنه يتعلق فقط بالمنظومات التي طاقتها ليست عالية جداً والتي لا تتحرك بسرعات تقترب من سرعة الضوء والتي لا تتعرض لحقول تثاقلية شديدة. إن تطوير «بديل بومي» لنظرية الحقل الكمومية النسبوية مازال جارياً، والنجاح النهائي لهذه المحاولة غير مضمون على الإطلاق؛ وإذا تبين بطريقة ما أن هذا البديل مستحيل، فعلينا أن نتخلى عن نظرية بوم، ويكون هذا هو المآل.

ولكن الواقع هو أن معظم الاقتراحات الأخرى لحل مشكلة القياس هي في المأزق نفسه. والاستثناءات هي، مرة أخرى، تفسيرات العوالم المتعددة والعقول المتعددة، والتي يمكن الحصول على تعميماتها النسبوية بشكل مباشر. لكن ادعاءاتها الميتافيزيائية يصعب تصديقها. وسيتوقف معظم الاتجاه المستقبلي في أساسيات ميكانيك الكم على نتائج محاولات إدخال النسبية في النظرية.

وفي الوقت نفسه، يتضح الآن أن قدراً أكبر كثيراً مما سبق القبول به بخصوص أساسيات الصورة التي لدينا عن العالم الفيزيائي لم يبت فيه جذرياً. لا سيما ان احتمالات كون قوانين الفيزياء حتمية تماماً وأن ما تصفه هذه القوانين هي حركة الجسيمات (أو شيئاً مشابهاً لهذه الحركة في نظرية الحقل الكمومية النسبوية)، هي مسائل قد عادت بشكل قاطع لتأخذ مكانها من جديد على طاولة البحث.



المؤلف

David Z. Albert.

أجرى دراسات علمية وفلسفية في النواحي المختلفة لميكانيك الكم، مع اهتمام خاص بمسألة القياسات الكمومية. وقد أخذ يفكر منذ فترة وجيزة في العلاقة بين هذه المسألة واتجاه الزمن. حصل ألبرت على الدكتوراه في الفيزياء النظرية من جامعة روكفلر، وقبل أن يمارس وظيفته الحالية أستاذاً للفلسفة في جامعة كولومبيا، كان أحد أعضاء هيئة التدريس في قسم الفيزياء بجامعة كارولينا الجنوبية في كولومبيا. كما كان أيضاً زميلاً لما بعد الدكتوراه في جامعة تل أبيب. وقد نشر كتابه (ميكانيك الكم والخبرة) Quantum Mechanics and Experience من قبل جامعة هارفارد.

مراجع للاستزادة

A Suggested Interpretation Of The Q ıantum Theory In Terms Of «HID-DEN» Variables, I and II. David Bohm in *Quantum theory and measurement* Edited by J.A. Wheeler and W.H. Zurek. Princeton University Press, 1983.

ON THE IMPOSSIBLE PILOT WAVE. In *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, by John S. Bell. Cambridge University Press, 1987.

Bohm's Theory. In *Quantum Mechanics and Experience*, by David Z Albert. Harvard University Press, 1992.

QUANTUM EQUILIBRIUM AND THE ORIGIN OF ABSOLUTE UNCERTAINTY. Detlef Dürr, Sheldon Goldstein and Nino Zanghi in *Journal of Statistical Physics*, Vol. 67, Nos. 5/6, Pages 843-908; June 1992.

الرؤية الكمومية في الظلام

ينبئ الضوء الكمومي بإمكان إجراء قياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات. وهذا يعني كشف أجسام دون الحاجة إلى إسقاط الضوء ــ أو أي شيء آخر ــ عليها.

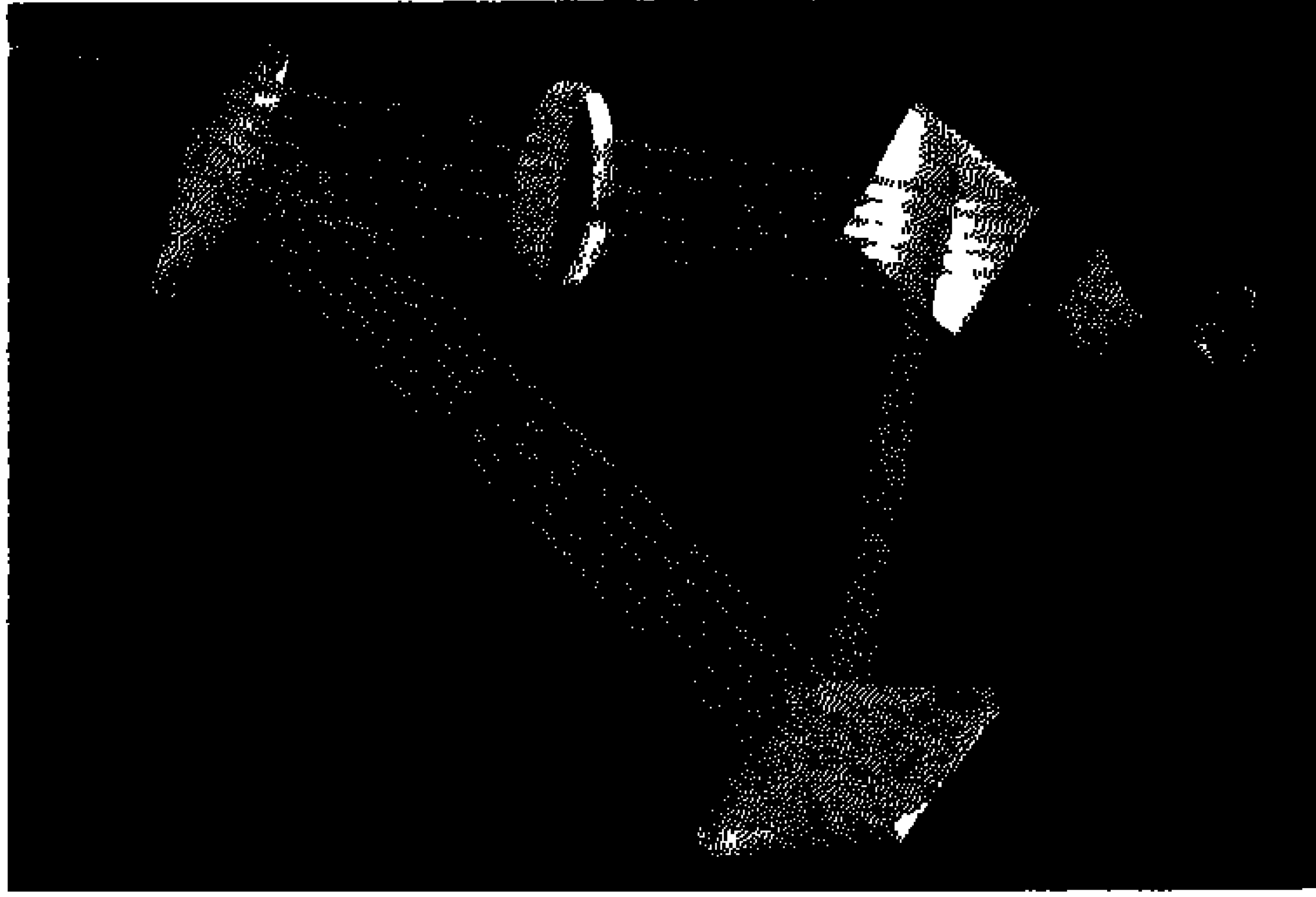
(ب. كويات) ــ (هــ. واينفورتر) ــ (أ. زايلينكر)

تروي أسطورة إغريقية أن البطل (برسيوس) *Perseus* اضطر إلى مقاتلة (الميدوزة) *Medusa* الرهيبة. كان شكل هذا الوحش كريهاً لدرجة أن مجرد النظر إليه يحوّل الناظر المنكوب فوراً إلى قطعة من الصخر. وتقول إحدى روايات هذه الأسطورة إن برسيوس تحاشى هذا المصير ببراعة استخدم فيها درعه كمرآة تعكس صورة الميدوزة بحيث تردها إلى صاحبتها التي تتحول هي نفسها إلى قطعة من الصخر. ولكن ماذا كان سيحدث لو لم يتمكن برسيوس من صقل درعه صقلاً جيداً؟ من الأرجح أنه كان سيلقى حتفه. فلو لجأ إلى إغماض عينيه لما استطاع أن يرى خصمه ويبلغ مراده. كما أن إلقاء نظرة خاطفة نحو الميدوزة يسبب تحويل قدر ضئيل من الضوء الساقط عليها إلى ضوء مرتد إلى عينه؛ وبمجرد «رؤية» هذا المسخ كان برسيوس سيلقى حتفه فوراً.

في عالم الفيزياء، قد يكون ممكناً تفسير هذا المأزق من خلال فكرة تبدو معقولة وشبه بديهية صدرت عام 1962 عن (د. كابور) الذي اخترع طريقة (التصوير الهولوكرافي) Holography وحاز بسببها جائزة نوبل. وقد أكد هذا الأخير أنه لا يمكن رؤية أي جسيم دون إسقاط فوتون واحد على الأقل عليه (الفوتون هو الجسيم، أو الكم، الأساسي للضوء).

لكن الفيزيائيين العاملين في مجال الضوئيات الكمومية المتزايد الغرابة تعلموا في السنين الماضية الأخيرة أن هذا الادعاء ليس بعيداً عن الصحة فحسب بل هو غير صحيح البتة، فنحن نعرف اليوم كيف نتأكد من وجود شيء لم يمسه أي فوتون قط.

يبدو أن هناك بعض التناقض في إجراء مثل هذا القياس الذي لا يُحدث تفاعلاً بين الجسيمات، فكيف يمكن إجراء القياس إذا لم يحدث أي تفاعل بين الجسيمات؟ لئن كان في هذا الأمر لغز واضح على صعيد الميكانيك التقليدي الذي هو حقل الفيزياء التي تهتم بدراسة حركة الأجسام المحسوسة، كالسيارة والكواكب وسواها من الأجسام غير البالغة الصغر، فإن الميكانيك الكمومي (وهو العلم الذي يدرس الإلكترونات والفوتونات وسواها من الجسيمات في عالم الذرات) يقول غير ذلك، فهو يرى إمكانية إجراء القياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات بفضل الميكانيك الكمومي و مــن



يمكن لحزمة ليزر تسلك مساراً لولبياً أن تبين ما يسمى مفعول زينو الكمومي، وهو عنصر من قياسات لا تحدث تفاعلاً بين الجسيمات.

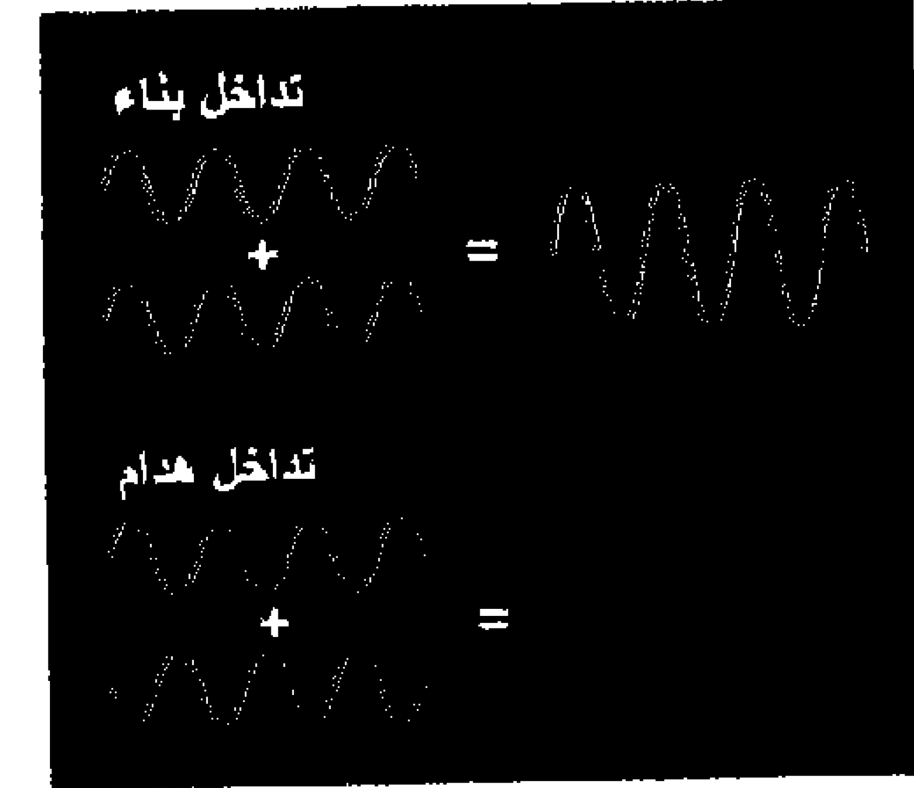
خلال تصاميم تجريبية بارعة. ولو كان فرساوس متسلحاً بمعرفة في الفيزياء الكمومية لاستطاع ابتكار طريقة لرؤية الميدوزة دون الحاجة إلى أي ضوء يسقط فعلاً على (الكركونة) Gorgon (وهي إحدى الميدوزات الأخوات الثلاث) ويرتد إلى عينيه. أي كان بإمكانه الرؤية دون أن يتعمد النظر.

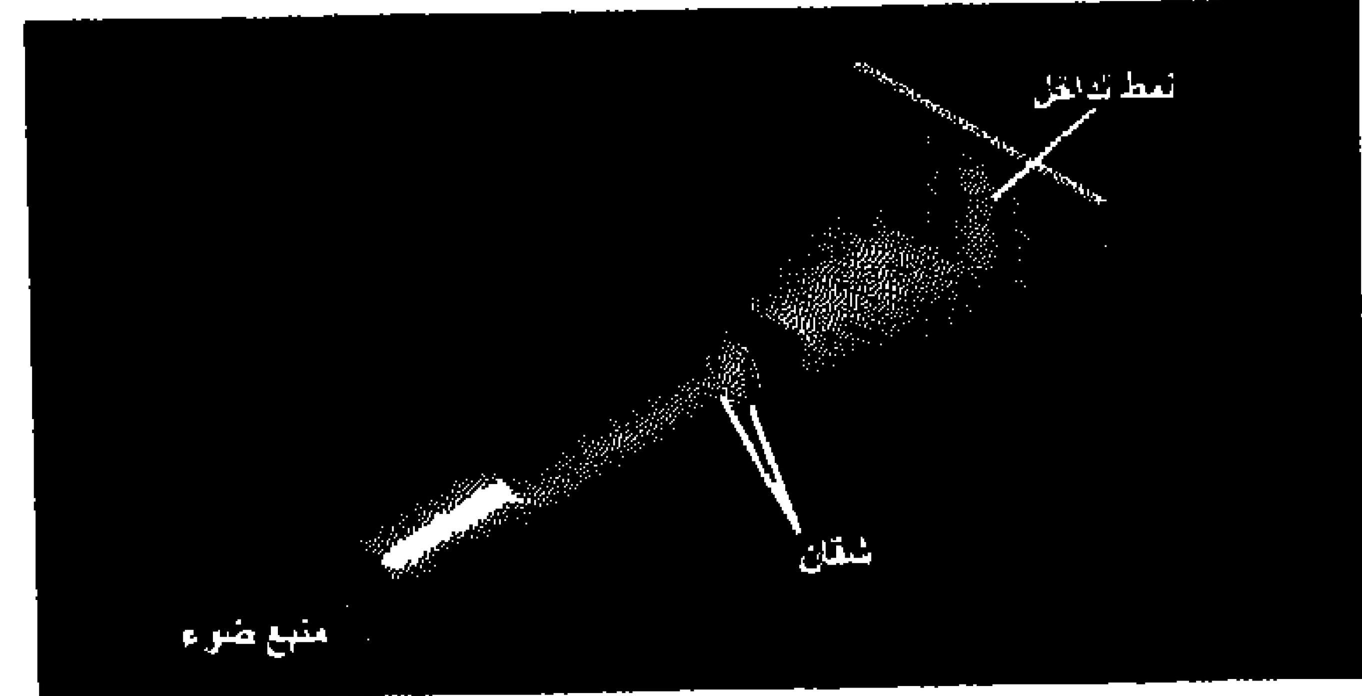
تقدم هذه المهارة الكمومية أفكاراً عديدة لبناء تصاميم يمكن استعمالها في الواقع. وربما كانت المضامين الفلسفية لهذه الأفكار أكثر عجباً. وتُفهم هذه التطبيقات والمضامين بشكل أفضل على صعيد التجارب الذهنية، التي تبسّط التحليلات التي تضم مجمل السمات الأساسية للتجارب الواقعية ولكن من دون تعقيدات إجرائية.

لنفحص، كتجربة ذهنية، ضرباً من لعبة الصدفة التي تستخدم فيها صدفتان وحصاة مخبأة تحت إحداهما. لكن الحصاة المستخدمة هنا تكون من نوع خاص؛ فهي ستتحول إلى تراب إذا تعرضت للضوء. ويحاول اللاعب تعيين مكان الحصاة دون أن يعرّضها للضوء أو أن يشوشها بأية طريقة، وإذا تحولت الحصاة إلى تراب يخسر اللاعب الجولة.

قد تبدو هذه المهمة مستحيلة لأول وهلة، لكننا ندرك سريعاً أنه مادام اللاعب مستمراً في إرادة النجاح خلال نصف عدد مرات اللعب فإن الاستراتيجية السهلة هي أن يرفع الصَّدَفة ويأمل بأنهــا







يحدث التداخل عندما يسلط ضوء الليزر عبر شقين، وهما يولّدان أمواجاً كروية متحدة المركز يتداخل بعضها مع بعض (في الأعلى). يمكن للموجتين الانضمام إحداهما إلى الأخرى انضماماً بنّاءً أو هدّاماً (في الوسط)، وهذا ما يعطي نمط تداخل ذا أهداب مضيئة ومظلمة على التناوب (في الأسفل).

لا تحوي الحصاة، فإذا كان على صواب سيعرف عندئذ أن الحصاة توجد تحت الصَّدَفة الأخرى، حتى وإن لم يكن قد رآها. إن الفوز بوساطة هذه الاستراتيجية ليس بالطبع أكثر من ضربة حظ سعيد.

لنذهب بعدئذ نحو خطوة تعديل لاحقة يبدو أنها تبسط اللعبة ولكنها في الواقع تجعلها مستحيلة على لاعب يريد الربح وهو متقيد بعالم الفيزياء التقليدية. لدينا في هذا التعديل صَدَفة واحدة فقط، وكذلك حظ عشوائي في إمكان وجود الحصاة تحتها أو عدم وجودها. وهدف اللاعب هو أن يحدد ما إذا كانت هناك حصاة تحتها، وذلك دون أن يعرضها للضوء أيضاً.

لنفترض أن وجود حصاة تحت الصَّدَفة، فإذا لم ينظر اللاعب تحت الصدفة فهو لن يكتسب أية معلومة. وإذا نظر تحتها سيعلم عندئذ أن الحصاة كانت هناك، باستثناء أنه عرَّضها للضوء بالضرورة، وبذلك لن يجد إلا كومة من الغبار. وقد يحاول اللاعب أن يخفت الضوء لدرجة أنه لا يبقى سوى حظ ضئيل جداً لسقوط الضوء على الحصاة. ولكن لكي يرى اللاعب الحصاة لا بد من سقوط فوتون واحد عليها على الأقل، وهذا يعني أنه (بحسب التعريف) قد خسر.

إيليتزور وفيدمان والقنبلة

لجعل اللعبة أكثر إثارة نفترض، مع (ف.س. إيليتزور) و(ل. فيدمان) وهما فيزيائيان يعملان في جامعة تل أبيب، أن الحصاة «قنبلة عظيمة» من شأنها أن تنفجر بمجرد سقوط فوتون واحد عليها. وعندها تصبح المسألة كما يلي: اعرف إذا كانت توجد حصاة انفجارية تحت الصدفة، ولكن لا تخرجها.

كان إيليتزور وفيدمان أول باحثين قدّما حلاً للمسألة، وكان حلهما صحيحاً في نصف عدد المرات في أحسن الأحوال، لكن ذلك كان أساسياً للبرهان على أي بريق أمل للفوز باللعبة.

وتستغل طريقتهما طبيعة الضوء الأساسية. وقد ذكرنا قبل قليل أن الضوء يتألف من جسيمات تدعى فوتونات (وهي تسمية تـنبئ بخاصية جسيمية)، ولكن يمكن للضوء أن يتخذ بجلاء صفات موجية أيضاً ــ نخص بالذكر ظاهرة التداخل التي تنضم فيها موجتان إحداهما مع الأخرى. فمثلاً، في تجربة الشقين المشهورة، يُرسل الضوء نحو شاشة بعيدة من خلال شقين أحدهما فوق الآخر. وعندئذ تظهر على الشاشة أهداب مظلمة ومضيئة على التناوب [انظر الشكل في أعلى الصفحة]. فالأهداب المضيئة تتعلق بالأمكنة التي تنضم فيها، بتداخل بنّاء، ذُرا وقيعان الأمواج الضوئية الآتية من أحد الشقين مع الذرا والقيعان الآتية من الشق الآخر. أما الأهداب المظلمة فتتعلق بتداخل هدّام تُلغي فيه الخصائص الآتية من أحد الشقين الذُرا الآتية من الشق الآخر. والطريقة الأخرى للتعبير عن هذا المفهوم هي القول بأن الأهداب المضيئة تتعلق بمناطق الشاشة التي تتمتع باحتمال كبير لورود الفوتونات عليها، أما الأهداب المظلمة فتنبئ باحتمال ضعيف لورود الفوتونات على هذه المناطق من الشاشة.

يحدث التداخل، بموجب قوانين الميكانيك الكمومي، في الأحيان التي توجد فيها أكثر من طريقة متاحة للحصول على نتيجة معينة وحين لا يمكن تمييز هذه الطرائق بعضها عن بعض بأية وسيلة (وهذا تعريف أكثر عمومية للتداخل مما يعطي عادة في الكتب التعليمية). ففي تجربة الشق المضاعف المذكورة هنا يمكن للضوء بلوغ الشاشة عبر مسارين متاحين (من الشق العلوي أو السفلي)، ولا توجد وسيلة لمعرفة الشق الذي يعبره كل فوتون. ويزول التداخل إذا استطعنا بطريقة ما تعيين الشق الذي عبَرَه الفوتون. وعندها يصل الفوتون إلى أية نقطة من الشاشة، ولا يظهر نتيجة ذلك أي هدب. وباختصار نقول إنه لا يمكن حدوث التداخل دون وجود مسارين غير متمايزين.

لمّا كان إيليتزور وفيدمان قد انطلقا في منظومة إجراء قياساتهما الافتراضية من مقياس تداخل (وهو تركيب يتألف من مرآتين وأداتين تشطران الحزمة) فإن الضوء الوارد إلى مقياس

التداخل يسقط على شاطر الحزمة الذي يُرسل الضوء في مسارين أحدهما علوي والآخر سُفلي. ثم يجتمع المساران عند شاطر الحزمة الأخر، الذي يرسل الضوء إلى أحد مكشافي الفوتونات وبذلك يعطي مقياس التداخل لكل فوتون مسارين متاحين بين منبع الضوء والمكشاف.

إذا تدبرنا أمرنا بحيث يتساوى طولا المسارين بالضبط عبر مقياس التداخل فإن هذا التدبير يصبح بالفعل تجربة شق مضاعف. والفارق الوحيد هو أن مكشافي الفوتونات يتخذان على الشاشة مكاناً يُظهر أهدافاً مظلمة ومضيئة. ويوضع أحد المكشافين بنحو يجعله يكشف فقط عما يكافئ أهدافاً مضيئة في حادث التداخل (لنسمّ هذا المكشاف مكشاف الإضاءة). أمّا المكشاف الأخر فيسجّل الأهداف المظلمة ــ أي لا يبلغه أيُّ فوتون (لنسمّه مكشاف الظلمة).

حصاة في خط المسار

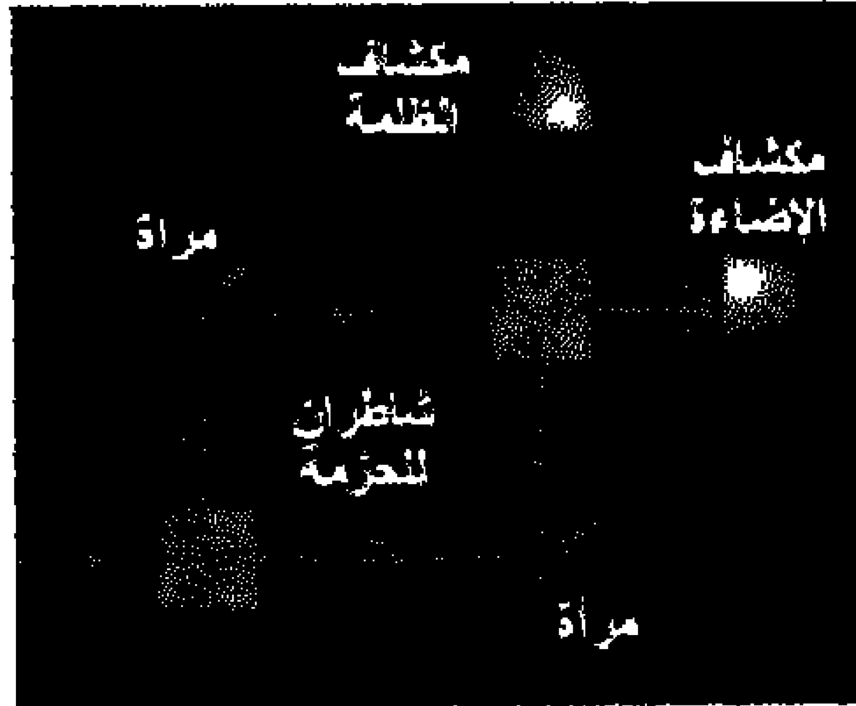
ماذا يحدث إذا وُضعت حصاة في أحد المسارين، ولنقل المسار العلوي؟ إذا افترضنا أنّ شاطر الحزمة الأول يعمل بشكل عشوائي (أي باحتمال شطر يساوي خمسين في المئة) فإن الفوتون الذي يأخذ المسار العلوي يضرب الحصاة (أو يفجّر القنبلة العظيمة) ولا يبلغ أبداً شاطر الحزمة الثاني.

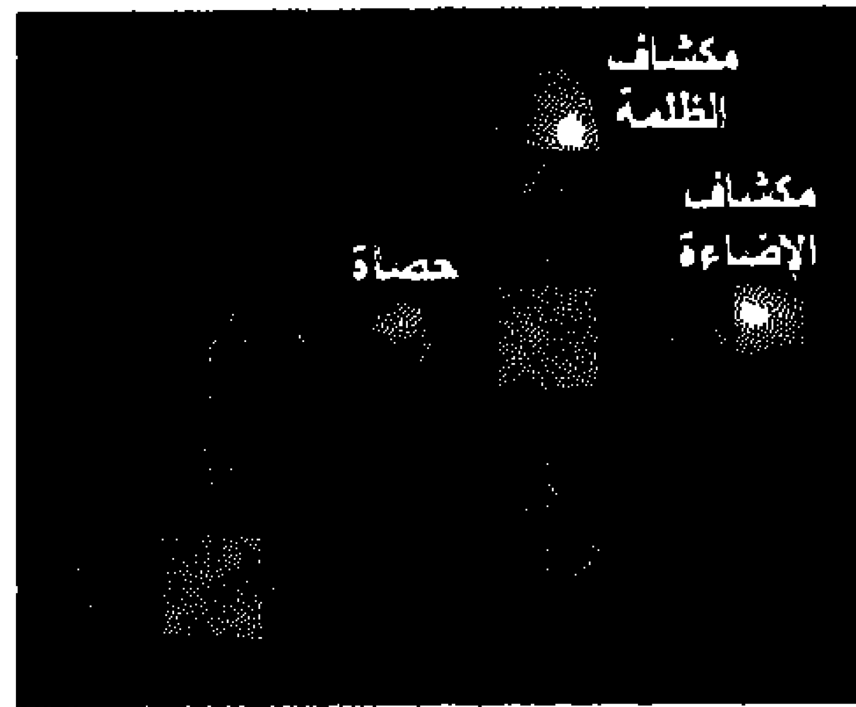
ولن يضرب الفوتون الحصاة إذا مر عبر المسار السفلي. زد على ذلك أن التداخل لن يحدث عند شاطر الحزمة الثاني؛ لأن الفوتون لا يملك سوى مسار واحد لبلوغ شاطر الحزمة الثاني. لذا يقوم الفوتون باختيار عشوائي آخر عند شاطر الحزمة الثاني. وهنا قد يتعرض الفوتون للانعكاس ويصيب مكشاف الإضاءة؛ لكن هذه النتيجة لا تعطي أية معلومة لأن من شأنها أن تحدث على أية حال وإن لم تكن الحصاة موجودة هناك. ولكن قد يتفق لفوتون أن يذهب أيضاً إلى مكشاف الظلمة. وإذا حدث ذلك، نعلم عندئذ علم اليقين أن جسماً كان موجوداً في أحد مساري مقياس التداخل، فلولا ذلك لما استطاع مكشاف الظلمة العمل. وبما أننا أرسلنا فوتوناً واحداً وظهر عند مكشاف الظلمة فلا يمكنه أن يكون قد مسَّ الحصاة. ونكون بذلك قد تدبرنا الأمر لإجراء قياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات ــ أي إننا قد تأكدنا من وجود الحصاة دون إحداث تفاعل معها.

وعلى الرغم من عمل هذا المخطط بنحو جزئي فإننا نُلحُّ هنا على أنه فعّال تماماً عندما يعمل. إن السحر الميكانيكي الكمومي الكامن في هذا العمل الفذ يقضي بأن لكل شيء، بما في ذلك الضوء، طبيعة مثنوية: جسيمية وموجية معاً. فعندما يكون مقياس التداخل فارغاً، يتصرف الضوء كموجة ويستطيع أن يصل إلى المكشافين سالكاً المسارين معاً في الآن ذاته، مما يؤدي إلى حدوث التداخل. وفي حالة وجود الحصاة يتصرف الضوء وكأنه جسيم لا يتجزأ ولا يسلك إلا مساراً واحداً. وهكذا نرى أن مجرد وجود الحصاة يزيل إمكان التداخل، على الرغم من عدم تفاعل الفوتون معها.



إن لعبة صدفة الفيزياء هي تجربة ذهنية توضح إمكان إجراء قياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات. قد توجد حصاة تحت صدفة؛ إذا مسَّ الحصاة أي ضوء فإنها تتحول إلى غبار. هل يستطيع المرء أن يعرف في أية صدفة تختبئ الحصاة؟

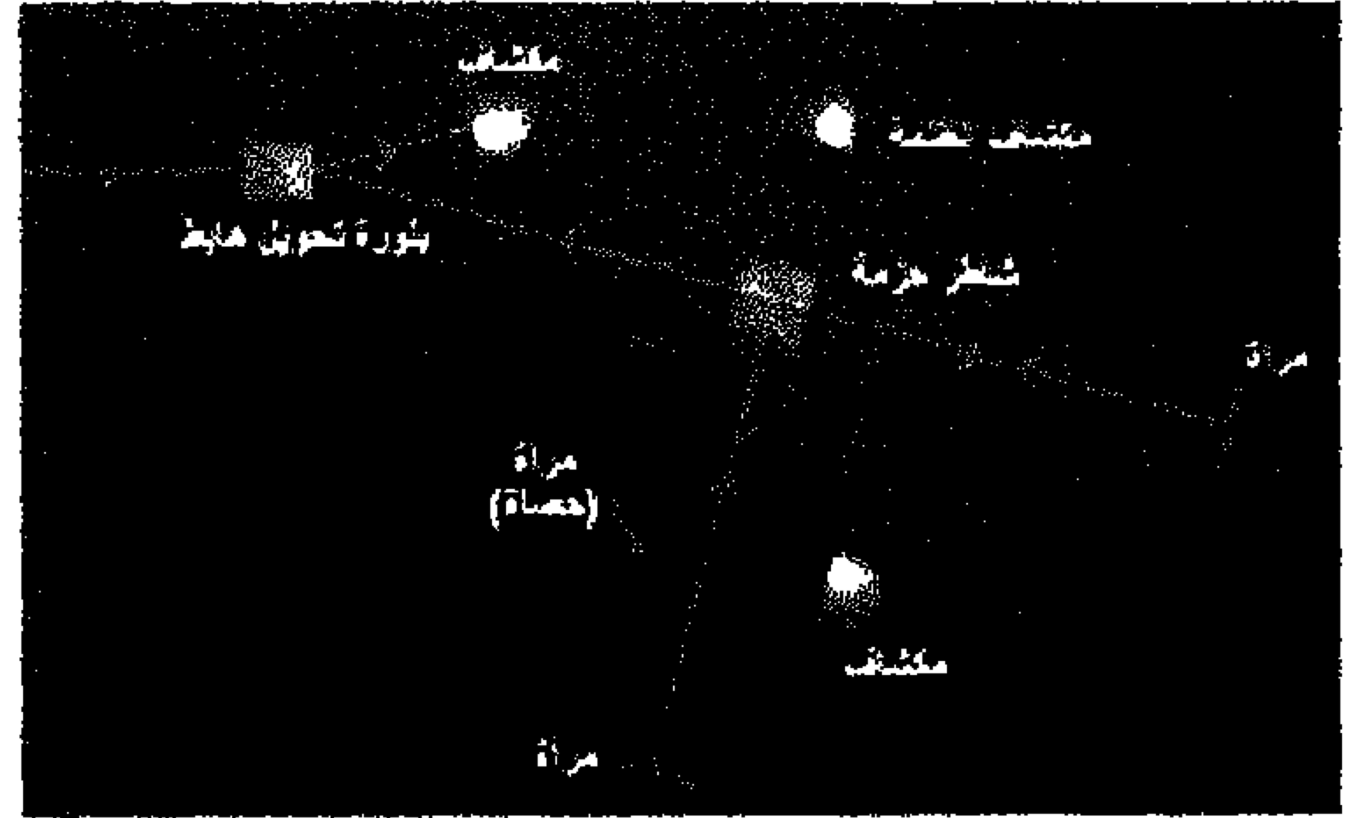


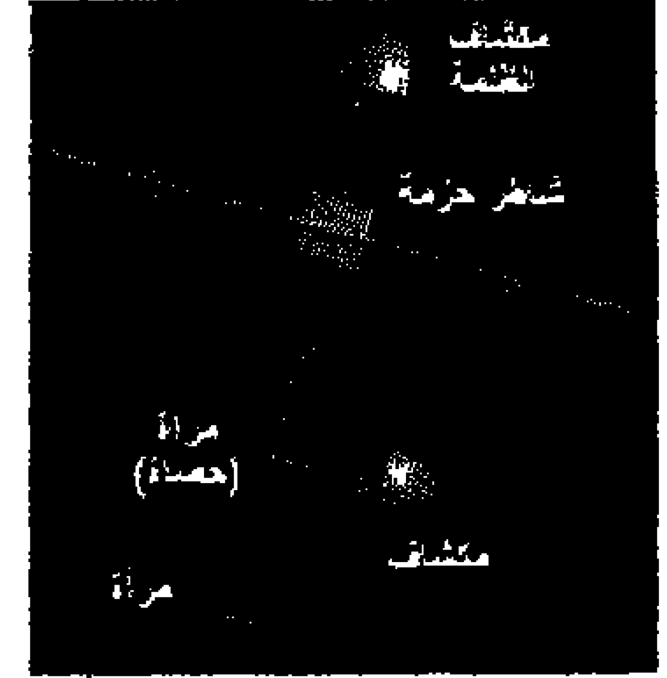


تعطي تجربة إيليتزور وفيدمان غباراً للفوتون في سلوك أحد المسارين. تكون العناصر الضوئية مدبَّرة (في الأعلى) بنحو يجعل الفوتونات تذهب دوماً نحو مكشاف الظلمة (الذي يوافق تداخلاً هدّاماً). لكن وجود حصاة في أحد المسارين يرسل أحياناً أحد الفوتونات إلى مكشاف الظلمة (في الأسفل)، مما يدل على حصول قياس دون تفاعل بين الجسيمات.

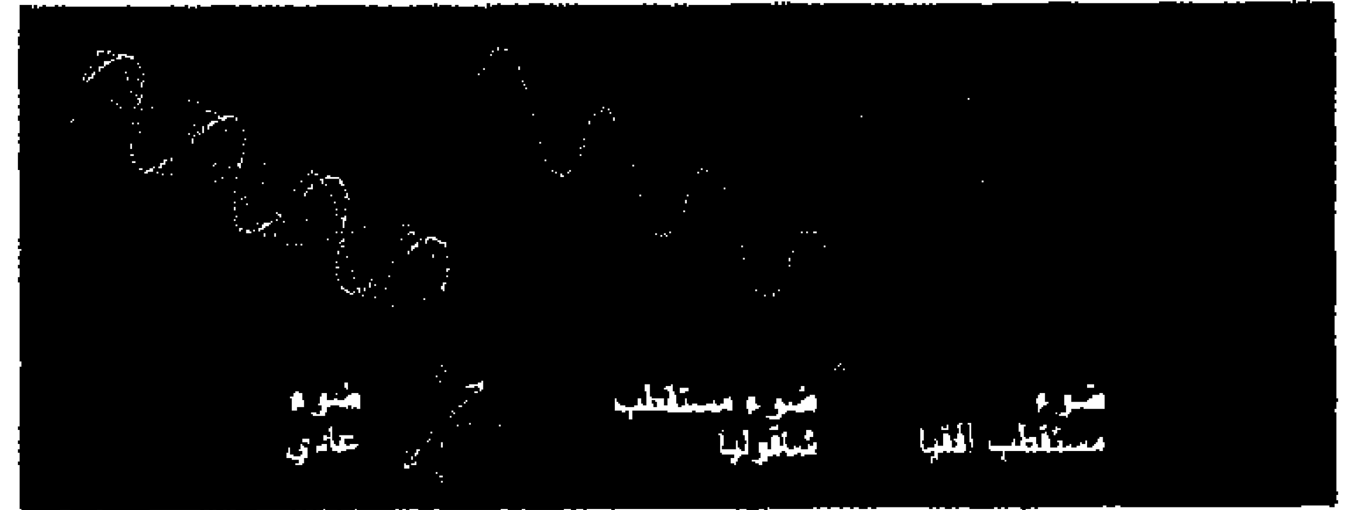
وللبرهان على أفكار إيليتزور وفيدمان أنجزنا قبل سنتين، بالاشتراك مع (ت. هرزوك)،الذي يعمل في جامعة جنيف حالياً، نسخة واقعية من تجربتهما الذهنية، وبرهنّا بذلك على إمكان صنع أدوات قياس لا تحدث تفاعلاً بين الجسيمات. كان منبع الفوتون الفرد هو بلورة ضوئية غير خطية خاصة. فعندما تُوجّه الفوتونات فوق البنفسجية من المنبع الليزري عبر البلورة، يحدث لها أحياناً (تحوّل هابط) Down-Conversion ينقسم فيه الفوتون الواحد إلى فوتونين ذوي طاقتين أخفض من طاقة الفوتون الأصلي، ثم ينطلقان صانعين بينهما زاوية تقارب ثلاثين درجة. وعند كشف أحد هذين الفوتونين الابنين نتأكد تماماً من وجود أخيه الذي نوجهه نحو تجربتنا.

يذهب هذا الفوتون ضمن مقياس تداخل (استعملنا، للتبسيط، مقياس تداخل من نوع مختلف قليلاً عن الذي اقترحه إيليتزور وفيدمان). وقد صفّت المرايا وشاطر الحزمة بنحو يجعل مجمل الفوتونات تعود من المسار نفسه الموافق لاتجاه ورودها (هذا يشبه الذهاب إلى مكشاف الإضاءة في نموذج إيليتزور وفيدمان أو الذهاب إلى هدف مضيء في تجربة الشق المضاعف). في حال غياب الحصاة كان حظ ذهاب الفوتون إلى مكشاف الظلمة ضئيلاً جداً بسبب التداخل الهدّام (وهذا يشبه الذهاب إلى الأهداف المظلمة في تجربة الشق المضاعف).





يستخدم برهانٌ على مخطط إيليتزور وفيدمان ضوءاً يصدر عن بلورة تحويل هابط ويدخل شاطر الحزمة ثم يرتد عن المرآتين ويتداخل مع نفسه من جديد عند شاطر الحزمة (في الأعلى). لا يصل أي ضوء إلى مكشاف الظلمة (وهذا يقابل تداخلاً هدّاماً، أما التداخل البنّاء فيحدث بالاتجاه الذي ورد منه الفوتون في البداية). فإذا دُسّت مرآة «حصاة» في مسار ضوئي فلا يحدث عندئذ أي تداخل عند شاطر الحزمة؛ لكن مكشاف الظلمة يستقبل فوتونات أحياناً (في الأسفل).



ينبئ الاستقطاب بالاهتزازات الضوئية وهي تسير في الفضاء.

لكنّ إدخال حصاة في أحد المسارين غيَّر من هذه الأرجحيات. والحصاة هنا هي عبارة عن مرآة صغيرة توجّه مسار الضوء إلى مكشاف آخر (مكشاف الحصاة). وهكذا وجدنا أن في نصف عدد المرات يسجّل مكشاف الحصاة وصول الفوتون، في حين أن مكشاف الظلمة يسجل وصول الفوتون في قرابة ربع عدد المرات (وفي سائر المرات يغادر الفوتون مقياس التداخل بالاتجاه نفسه الذي ورد منه، ولا نحصل على أي معلومة). وهكذا نرى أن انطلاق مكشاف الظلمة يعبّر عن كشف الحصاة دون إحداث تفاعل بين الفوتون والحصاة.

وبتعميم بسيط لهذا المخطط أضعفنا انعكاسية شاطر الحزمة، وهذا يؤدي إلى إنقاص حظ الفوتونات في الانعكاس كي تذهب في المسار الذي يحوي المرآة ومكشاف الحصاة، فكان الذي وجدناه ــ وبما يتفق مع التنبؤ النظري ــ أن احتمال ذهاب الفوتونات إلى مكشاف الحصاة صار يتساوى بالتدريج مع احتمال ذهابها إلى مكشاف الظلمة. وهذا يعني أن استعمال شاطر حزمة ضعيف الانعكاسية يمكن أن يجعل نصف القياسات في مخطط إيليتزور وفيدمان تجري دون إحداث تفاعل بين الجسيمات (الحالات التي تغادر الفوتونات فيها مقياس التداخل بالاتجاه الذي وردت منه لا تعدّ هنا كقياسات).

مفعول زينو الكمومي

إن السؤال الذي يطرح نفسه هو: هل تكون نسبة الخمسين في المئة هي أفضل ما يمكننا إنجازه؟ وفيما مضى شاعت بيننا مُحاجة وجيهة تدفع إلى الاعتقاد بعدم وجود تصميم آخر من شأنه أن يحسّن هذه الأرجحيات. لكن (م.أ. كازيفيتش)، من جامعة ستانفورد، الذي زارنا لمدة شهر في إنسبروك في الشهر 1994/1 أرشدنا إلى حل يتيح لنا، إذا تحقق، اكتشاف أجسام لا تحتاج إلى التفاعل بعضها مع بعض بشكل دائم تقريباً. لم تكن تلك المناسبة الأولى، ولا الأخيرة لحسن الحظ التي ينتصر فيها التفاؤل الكمومي على التشاؤم الكمومي.

تشبه هذه الطريقة الجديدة تطبيق ظاهرة كمومية، غريبة هي الأخرى، كان أول من ناقشها بالتفصيل عام 1977 (ب. ميسرا)، الذي يعمل في جامعة بروكسل، و(إ.س.ج. سودارشان)، من جامعة تكساس في أُستين ففي الأساس يمكن لأية منظومة كمومية أن (تُحبس) Trapped في حالتها البدئية؛ ولو أنها كانت قادرة على التطور إلى حالة أخرى إذا تُركت لشأنها. وينجم هذا الإمكان عن المفعول الغريب الذي يطرأ على المنظومات الكمومية من جراء عمليات قياسها. وتسمى هذه الظاهرة مفعول زينو؛ لأنها تشبه المفارقة التي طرحها الفيلسوف الإغريقي (زينو)[1] Zeno الذي أنكر إمكان الحركة على السهم الطائر، لأن هذا السهم يبدو «مستقراً» في كل لحظة من لحظات طيرانه. وهي أيضاً معروفة باسم القِدْر المرقوبة؛ لأنها تذكر بالحكمة المأثورة حول غليان الماء. فنحن نعلم أن مجرد مراقبة القِدْر ليس لها أي تأثير في

---

(1) هو زينو الإيلي، عاش في القرن الخامس قبل الميلاد، (يلفظ اسمه Zénon «زنون» عند الناطقين بالفرنسية)، أثرت حججه في تاريخ الفكر كثيراً . من هذه الحجج: أخيل الذي لا يستطيع أبداً اللحاق بالسلحفاة، والسهم الطائر الذي لايستطيع أبداً اللحاق بالسلحفاة، والسهم الطائر المستقر في مكانه، إلخ. يرتكز دحض هذه الحجج على نقد التصور الذي أعطاه زينو للمكان والزمان اللذين يعتبرهما قابلين للتجزيء بصورة لا نهائية. وقد سمحت هذه الأفكار للباحثين المعاصرين بعرض تصورات جديدة عن الزمان والمكان. ألف زينو كتباً عديدة في الطبيعة، كما أنّ أرسطو عرض حججه ودحضها في كتابه Physica. (يجب عدم الخلط بين زينو الإيلي وزينو الرواقي مؤسس الفلسفة الرواقية الذي عاش في القرن الثالث قبل الميلاد). [انظر: «حل مفارقات زينو». مجلة العلوم، العدد 10 (1996)، ص62]. (المحرر)

الوقت الذي يستغرقه الماء كي يغلي. لكن مثل هذا المفعول موجود فعلاً في الميكانيك الكمومي، فعمليات القياس تؤثر في النتيجة (يدعى هذا المبدأ «مسلمة الإسقاط» Projection Postulate).

لقد أعاد كازيفيتش جوهرياً اختراع أبسط مثال على هذا المفعول الذي كان (إ. بيريز) أول من صممه عام 1980. ويستثمر هذا المثال أيضاً إحدى خاصيات الضوء. وهي ظاهرة الاستقطاب. تعبّر هذه الظاهرة عن المنحنى الذي تتخذه الأمواج الضوئية في اهتزازها، صعوداً وهبوطاً في استقطاب شاقولي أو جيئة وذهاباً في استقطاب أفقي، وتكون هذه المناحي الاهتزازية متعامدة مع منحى انتشار الضوء. وبصورة عامة يهتز الضوء القادم من الشمس ومن المنابع العادية الأخرى في كل المناحي، لكننا نهتم هنا خصوصاً بالاستقطابين: الشاقولي والأفقي.

لندرس فوتوناً موجّهاً عبر سلسلة مؤلفة من ست أدوات استقطابية مثلاً، حيث يدوّر كلٌ منها استقطاب الضوء قليلاً بما يجعل الفوتون ذا الاستقطاب الأفقي يصبح ذا استقطاب شاقولي. وقد تكون أدوات هذا التدوير خلايا زجاجية محتوية على السكر المنحل في الماء مثلاً: ثم يصل الفوتون في نهاية رحلته عبر المدوِّرات إلى أداة مقطِّبة، وهي تركيب لا يسمح بالمرور إلا لأحد نوعي الاستقطاب ويمتص الفوتونات المستقطبة بنحو عمودي على النوع الذي يمر عبر التركيب. وهكذا نرى أن المقطِّب لا ينقل إلى المكشاف، في هذه التجربة الذهنية، سوى الضوء المستقطب أفقياً.

ننطلق من فوتون مستقطب أفقياً، وسيدوّر كل مدوِّر الاستقطاب خمس عشرة درجة. ومن الجلي أن هذا الفوتون لن يصل أبداً إلى المكشاف لأن استقطابه سيكون بعد مروره عبر الخلايا قد دار تسعين درجة (خمس عشرة درجة في كل واحد من المدورات الستة على التوالي) ليصبح شاقولياً، ويمتص المقطِّب الفوتون. وهذا التدوير التدريجي للاستقطاب هو الحركة الكمومية التي نريد لجمها.

تؤدي عملية دسّ مقطِّب أفقي بين كل مدوِّر استقطابي الحيلة المقصودة. والسبب هو أن منحى الاستقطاب لا يكون قد دار كثيراً جداً عن المنحى الأفقي بعد المدور الأول. وهذا يعني أن احتمال امتصاص الفوتون في المقطب الأفقي الأول يكون ضعيفاً جداً، 6.7 في المئة فقط (وهو معطى بمربع جيب زاوية الدوران).

إذا لم يتم امتصاص الفوتون في المقطِّب الأول فإنه سيظل في حالة استقطاب أفقي حتماً، لأنها الحالة الوحيدة المتاحة للضوء الذي اخترق مقطباً أفقياً. وعند المدوِّر الثاني يدور منحني الاستقطاب خمس عشرة درجة من جديد؛ وعند المقطب الثاني يكون له احتمال صغير كالأول ليتعرض للامتصاص، وإلا فإنه سينتقل مرة أخرى إلى حالة استقطاب أفقي. وهكذا تتكرر العملية إلى أن يصل الفوتون إلى المقطب الأخير.

يمر الفوتون الوارد عبر المقطبات الستة المدسوسة بحيث يصل للمكشاف في قرابة ثلثي عدد المرات، حيث يعطى هذا

يمكن البرهان على مفعول زينو الكمومي باستعمال أدوات تدوِّر الاستقطاب خمس عشرة درجة. وبعد اختراق ستةٍ من هذه المدوِّرات يتحول الاستقطاب من أفقي إلى شاقولي، وبذلك يمتصه المقطِّب (الصف العلوي). ولكنْ دسُّ مقطِّب بعد كل مدوِّر سيمنع الاستقطاب من الدوران (الصف السفلي).

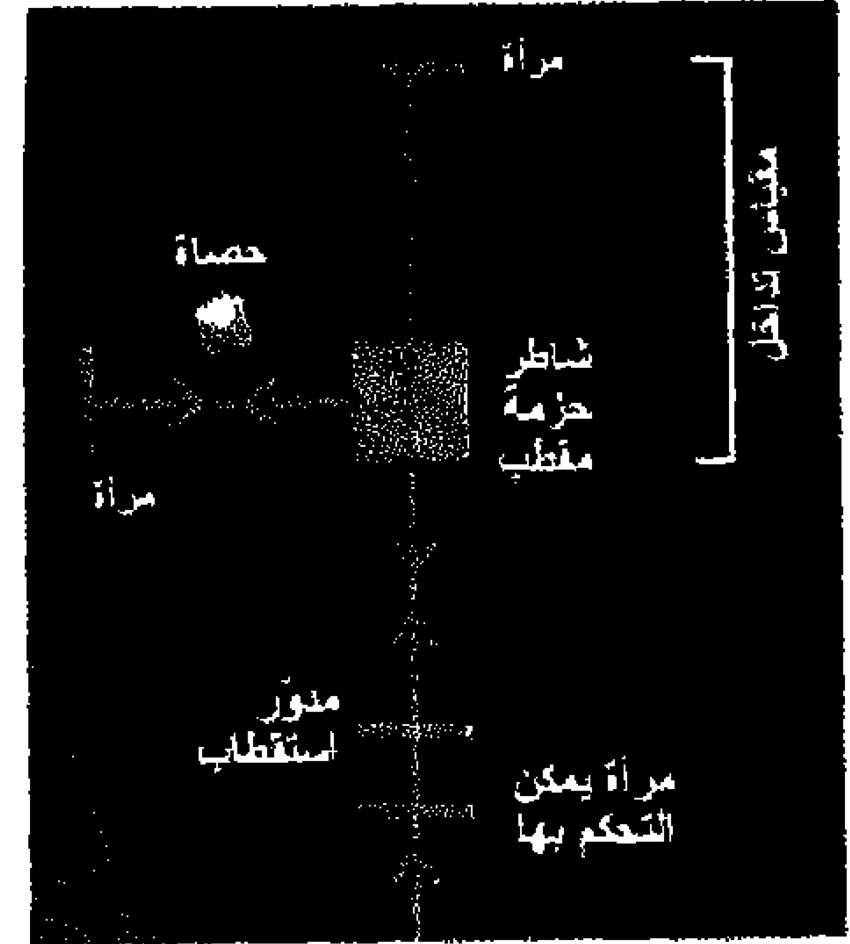
تم إنجاز تجريبي لمفعول زينو الكمومي بجعل الفوتون يتبع مساراً لولبياً متدرجاً، بشكل يجعله يخترق مدوِّر الاستقطاب ست مرات. يلغي دسُّ مقطِّب بعد المدوِّر عملية دوران استقطاب الفوتون.

الاحتمال بالعلاقة $[COS^2(15\ degrees)]^6$. ولدى استمرارنا في زيادة عدد المراحل ــ أي لدى إنقاص زاوية دوران الاستقطاب عند كل مرحلة بالمقدار المقابل (وهو تسعون درجة مقسومة على عدد المراحل) ــ فإن احتمال مرور الفوتون يتزايد. ومن أجل عشرين مرحلة يصل احتمال وصول الفوتون إلى المكشاف إلى 90 في المئة. فإذا استطعنا صنع منظومة ذات 2500 مرحلة فإن احتمال امتصاص الفوتون في أحد المقطبات سيصبح واحداً بالألف فقط. وإذا وضعنا عدداً لا نهائياً من المراحل، عندئذ يمر الفوتون مروراً محتوماً. وبذلك نكون قد لجمنا حركة الدوران.

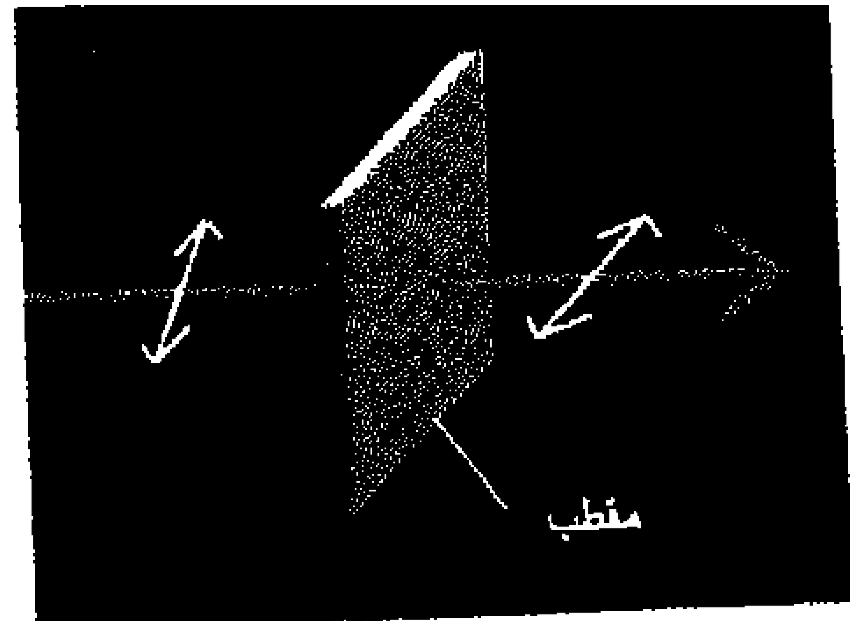
ولتحقيق مفعول زينو الكمومي استخدمنا البلورة اللاخطية نفسها لتحضير فوتون فرد. وبدلاً من استعمال ستة مدوِّرات وستة مقطِّبات اكتفينا بواحد من كل منها. ولإنجاز المفعول نفسه أجبرنا الفوتون على اختراقها ست مرات وذلك باستخدام ثلاث مرايا كنوع من الدرج اللولبي. ففي غياب المقطِّب يكون الفوتون الخارج من الدرج في حالة استقطاب شاقولي دوماً . وفـي حال وجود المقطِّب

وجدنا أن الفوتون كان مستقطباً أفقياً (ما لم يوقفه المقطِّب). وتحدث هذه الحالات في قرابة ثلثي عدد المرات في حال وجود ست حلقات تجريبية، كما كنا نتوقع من تجربتنا الذهنية.

ثم شرعنا في إجراء قياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات ـ أي كشف جسم كامد دون إسقاط أي فوتونات عليه ـ وذلك بأسلوب عالي الأداء. لذا صممنا منظومة هجينة تجمع بين مثال زينو وطريقة إيليتزور وفيدمان الأصلية. في هذه الحال يترك الفوتون المستقطب أفقياً ضمن المنظومة ليقوم ببضع دورات (ست أيضاً، مثلاً) قبل أن يغادرها. (لهذا الغرض يحتاج المرء إلى مرآة تسمى «مبدِّلاً» switch يمكن التحكم في دسِّها ضمن المنظومة وإخراجها منها بسرعة كبيرة. ولحسن الحظ كانت هذه المرايا التي هي أجهزة تداخلية يُتحكم فيها قد طُوِّرت حديثاً من أجل الليزرات النبضية). في أحد طرفي المنظومة يوجد مدوِّر استقطابي يدوِّر استقطاب الفوتون بمقدار خمس عشرة درجة في كل دورة، أما الطرف الآخر فيحتوي على مقياس تداخل استقطابي؛ وهو يتألف من شاطر حزمة استقطابي ومن مقياس استقطاب ذي ذراعين متساويتي الطول، لكل منهما مرآة عند كل طرف.



تقتضي جودة أداء عمليات القياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات أن تضمَّ تركيبة مفعول زينو الكمومي مع مخطط إيليتزر وفيدمان. يدخل الفوتون من جانب المرآة المتحكم في وضعها ويسلك المسارات الضوئية ست مرات قبل أن يتاح له الخروج عبر المرآة. وسيظل استقطابه النهائي أفقياً إذا وجدت حصاة في أحد المسارين؛ فلولا ذلك لكان عليه الدوران نحو الاستقطاب الشاقولي.



مسلَّمة الإسقاط

تنص هذه المسلمة على أنه عند إجراء أية عملية قياس على منظومة كمومية فإننا سنحصل على بعض النتائج الممكنة فحسب، ثم إن المنظومة الكمومية تصبح بعد إجراء القياس في حالة تعيِّنها النتائج الحاصلة. وهذا يعني أن الفوتون الذي اخترق مقطِّباً أفقياً يكونُ بالضرورة مستقطباً أفقياً ولو كان في الأصل مستقطباً بمنحى شبه شاقولي (حيث يزيل المقطِّب الأفقي مركّبة الاستقطاب الشاقولية للفوتون)، لذا يكون احتمال مرور الفوتون في هذه الحالة ضعيفاً.

عند شاطر الحزمة المقطِّب يمر كل الضوء المستقطب أفقيا وينعكس كل الضوء المستقطب شاقوليا. وجوهر الأمر أن خياري المرور والانعكاس يشبهان المسارين في تجربة الشق المضاعف.

ففي حال عدم وجود جسم في مقياس التداخل ينقسم الضوء عند شاطر الحزمة وفقا لنوع استقطابه وينعكس عن المرايا في كل مسار فيعيد شاطر الحزمة اجتماع القسمين. وبنتيجة ذلك يخرج الفوتون ومازال استقطابه كما كان قبل دخوله في مقياس التداخل (أي باستقطاب يدور خمس عشرة درجة نحو الشاقول). وهكذا بعد ست دورات ينتهي الاستقطاب بالدوران حتى الوصول إلى الشاقول.

ويتغير الحال عند وضع جسم كامد في مسار الاستقطاب الشاقولي لمقياس التداخل. ويشبه هذا الوضع حالة دسِّ ستة مقطبات في تجربة مفعول زينو الكمومي. وعلى هذا، ففي الدورة الأولى يكون احتمال دخول الفوتون (الذي دار استقطابه خمس عشرة درجة فقط عن مسار الاستقطاب الأفقي) في مسار الاستقطاب الشاقولي (ويمتصه الجسم عندئذ) صغيرا جدا (6.7 في المئة، كما في تجربة زينو الذهنية). ويعني عدم حدوث هذا الامتصاص أن الفوتون قد دخل حتما في المسار الأفقي وأعيد استقطابه ليصبح أفقيا صرفا.

وعلى غرار مثال زينو، تتكرر العملية برمتها في كل دورة إلى أن تُنزع المرآة السفلية بعد ست دورات ويغادر الفوتون المنظومة. وعند قياس استقطاب الفوتون نجده مازال أفقياً، مما يعني حتماً وجود حاجز في مقياس التداخل. ولولا ذلك لكان من شأن الفوتون أن يكون قد قُطِّب شاقوليا عند مغادرة المنظومة. وباستخدام دورات أكثر عدداً نستطيع جعل احتمال امتصاص الجسم للفوتون صغيراً بقدر ما نريد. وقد تبين، من نتائج أولية في تجربة حديثة جرت في المختبر الوطني بلوس ألاموس، أنه يمكن الوصول إلى نسبة تصل إلى سبعين في المئة من القياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات. ونأمل بأن نزيد هذه النسبة قريباً لتصل إلى 85 في المئة.

تطبيق السحر الكمومي

ما الفائدة المكتسبة من هذه الممارسات الكمومية كلها؟ إننا نشعر بأن الوضع الحالي يشبه تباشير عهد الليزر عندما كان رجال العلم يعرفون أن الليزر سيكون حلاً مثالياً للكثير من المسائل المجهولة. يمكن استعمال الطريقة الجديدة لإجراء القياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات كوسيلة غير عادية للتصوير مثلاً، بحيث نصور فيها الجسم دون الحاجة إلى تعريضه للضوء.

يتوقع أن تعمل طريقة «التصوير» كما يلي: بدلاً من إشراك فوتون واحد في العملية فإننا نشرك فوتونات كثيرة، بمعدل فوتون

واحد لكل عنصورة «بيكسل» Pixel، وننجز بها قياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات. في المناطق التي لا يعترض فيها الجسم مسار الضوء الواصل إلى مقياس التداخل سيعاني استقطاب الفوتونات الأفقي الدوران التدريجي نحو الشاقول. أما في مناطق اعتراض الجسم لمسار الضوء فستمتص بعض الفوتونات؛ أما ما يبقى منها فسيُحبس استقطابها في الحالة الأفقية. وبالنتيجة تكون قد أخذنا صورة للفوتونات عبر مرشّح مقطّب بعد أن تكون قد أجرت العدد المطلوب من الدورات.

فإذا وُضع المرشح أفقياً نحصل على صورة للجسم؛ أما إذا وضع عمودياً فنحصل على الصورة السلبية له. وفي كل الأحوال تتشكل الصورة بفوتونات لم تمس الجسم قط. ويمكن أن تعمل هذه الطرائق في حالة جسم شفاف أيضا، ويحتمل أن تعمم بحيث تكشف عن لون الجسم (ولو أن هذه الأهداف ستكون أصعب تحقيقاً).

قد نجد في المستقبل تعديلا لهذه الطريقة في التصوير يثبت فائدته في الطب (كوسيلة لتصوير الخلايا الحية مثلاً). تخيل أننا نستطيع تصوير المرضى بالأشعة السينية دون تعريضهم لعدة مرات لأشعة سينية نفاذة. وستطرح هذه الطريقة في التصوير أخطاراً أقل على المريض مما تطرحه الأشعة السينية العادية (إن مثل هذا التصوير بأشعة سينية يصعب تنفيذه بسبب صعوبة الحصول على عناصر ضوئية لهذه الأطوال الموجية من الضوء).

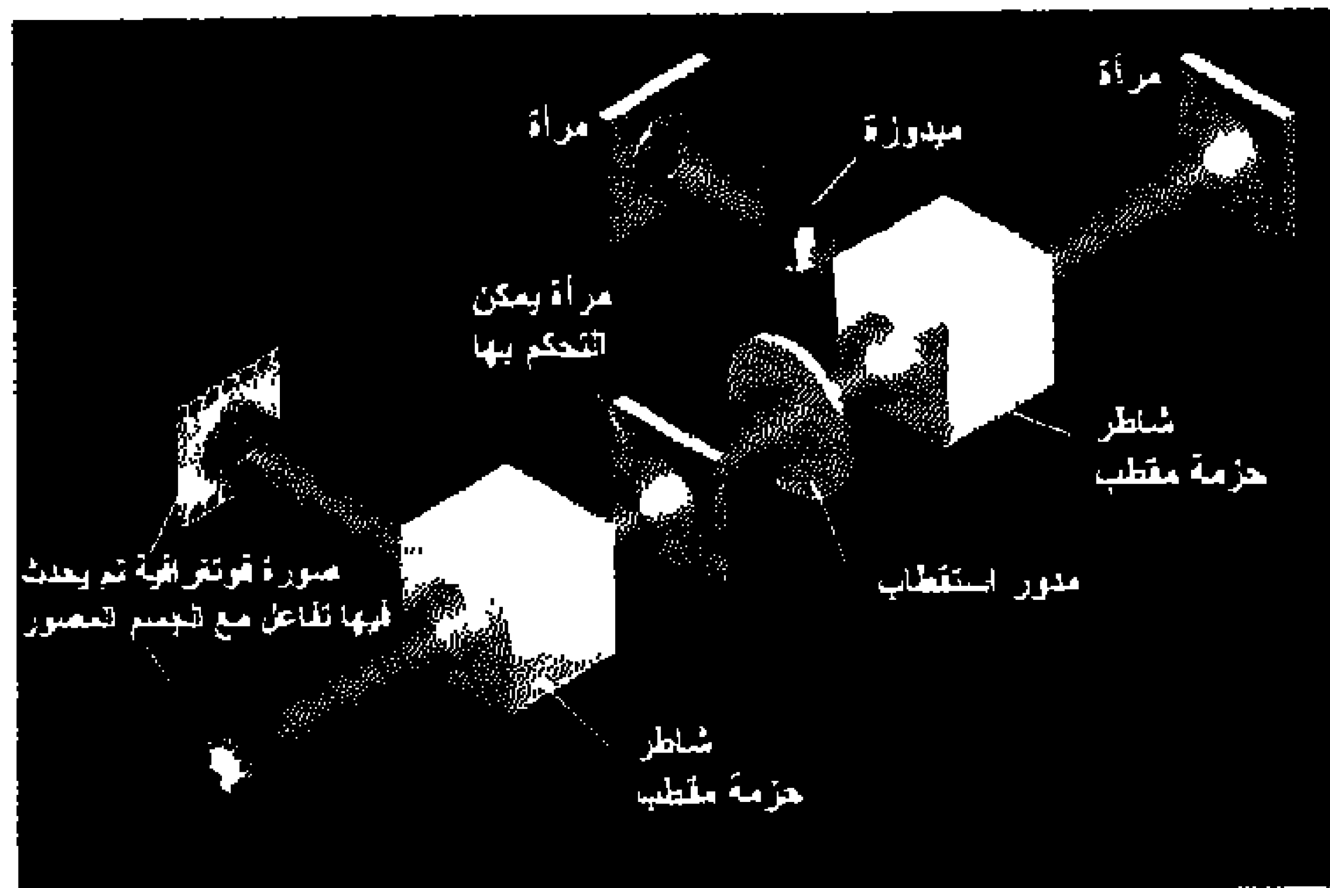
إن تصوير غيوم الذرات البالغة البرودة، المنتجة حديثاً في عدة مختبرات، هو عملية مرشّحة لتطبيق فوري لهذه الطريقة. فأبرد هذه الذرات تكون في حالة (تكاثف بوز ـــ آينشتاين) Bose-Einstein Condensation، وهو ضرب جديد من الحالة الكمومية التي تتصرف فيها ذرات كثيرة بصورة جماعية وكأنها كينونة واحدة ـــ أي إن حركتها تكون بطيئة جداً ـــ لدرجة أنه بوسع فوتون واحد نبذ إحدى الذرات إلى خارج الغيمة. وفي الأصل لم تكن هناك طريقة للحصول على صورة (للكثافة) Condensate دون تخريب الغيمة. ولربما تكون طرائق القياسات دون إحداث تفاعل بين الجسيمات هي إحدى وسائل تصوير هذه التجمعات الذرية.

إضافة إلى تصوير الأجسام الكمومية، بوسع عمليات القياس ـــ دون إحداث تفاعل بين الجسيمات ـــ التأكد من وجود بعض هذه الأجسام. وبهذا الصدد نخص بالذكر إمكان تناول هذه الطرائق إيجاد «قطة شرودينكر»، وهي كائن طالما أولع به الباحثون النظريون في الميكانيك الكمومي: فهذا السنّور الكمومي محضَّر بحيث يكون في حالتين اثنتين في الوقت ذاته: إنه حي وميت معاً (أي إنه انضمام للحالتين). ومؤخراً حاول باحثون في المؤسسة الوطنية الأمريكية للمعايير والتقانة إيجاد ضرب أولي من قطة (هريرة، قطيطة) شرودينكر باستعمال إيون (شاردة) البريليوم. واستخدموا مزيداً من ليزرات وحقول كهرمغنطيسية لجعل الإيون موجوداً في الآن ذاته في مكانين تفصل بينهما مسافة 83 نانومتراً (وهي مسافة شاسعة بالمقياس الكمومي).

إذا استجوب إيون باستعمال طرائق القياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات فسيصبح الفوتون المستجوب بدوره في حالة انضمام، إذ قد يصبح ذا استقطاب أفقي وشاقولي في الآن ذاته. والواقع أنه سيكون بوسع التجربة التي ناقشناها سابقاً وضع عشرين فوتوناً مثلاً في مضمومة استقطاب أفقي وشاقولي في الآن ذاته. ومن شأن كل فوتون أن «يعرف» أن له استقطاب الفوتونات الأخرى ذاته، ولكن لا يعرف أحد منها نوع استقطابه. وبذلك تظل الفوتونات جميعاً في هذه المضمومة إلى أن تحصل عملية قياس تنبئ بنوع الاستقطاب، إن كان أفقياً أم شاقولياً. فهذه الكومة الفوتونية المحسوسة الحجم، التي تحوي فوتونات متلاصقة في هذه الحالة الخاصة، تُظهر أن المفاعيل الكمومية يمكن أن تتجلى في عالم المحسوسات أيضا.

وإذا لم نتعد مجال الحياة اليومية فإن فكرة إجراء القياسات التي لا تُحدث تفاعلاً بين الجسيمات تبدو غريبة. إن لم نقل إنها لا تعدو اللغو العديم المعنى، ولكنها قد تبدو أقل غرابة لمن يحتفظ في ذاكرته بأن مجال عمل الميكانيك الكمومي هو عالم الإمكانات المستقبلية. وربما كنا، عند إجرائنا قياسات تُحدث تفاعلاً بين الجسيمات، نمنع حصول القياسات التي لا تُحدث تفاعلاً بينها.

وإذا لم تقتنع بذلك فعزاؤك، أيها القارئ العزيز، هو أن الفيزيائيين أنفسهم، عبر سنوات طويلة، قد مروا في أوقات عصيبة على طريق القبول بغرابة العالم الكمومي. هذا وإن مفاتيح سحر هذه السمات الكمومية، وهي التتامية بين المظهرين الموجي والجسيمي للضوء وطبيعة القياسات الكمومية ـــ قد عُرفت منذ ثلاثينيات هذا القرن. ولم يحدث انطلاق الفيزيائيين إلى تطبيق هذه الأفكار لاكتشاف ظواهر جديدة في معالجة المعلومات الكمومية إلا حديثاً، بما في ذلك القدرة على الرؤية في الظلام.



يمكن التصوير باستعمال طرائق القياس دون إحداث تفاعل بين الجسيمات. وبهذا الشكل سيمتص الجسم ـــ ولنقل «الميدوزة» التي يجب عدم رؤيتها بصورة مباشرة ـــ قدراً ضئيلاً من الفوتونات.

المؤلفون

P. Kwiat – H. Weinfurter – A. Zeilinger.

باحثون في جامعة إنسبروك. حصل كويات، الذي يعمل حالياً في مختبر لوس ألاموس، على الدكتوراه من جامعة كاليفورنيا. أما واينفورتر فحصل على الدكتوراه من جامعة فيينا التقانية، ثم تابع دراسات ما بعد الدكتوراه في معهد هاهن – مايتنر ببرلين. وهو يتمتع حالياً بكل مزايا زمالته لأكاديمية العلوم النمساوية. حصل زايلينكر، وهو عضو في أكاديمية العلوم النمساوية، على الدكتوراه من جامعة فيينا ثم درَّس في جامعات ومعاهد عالمية.

مراجع للاستزادة

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. Richard P. Feynman. Princeton University Press. 1985.

QUANTUM MECHANICAL INTERACTION-FREE MEASUREMENTS. Avshalom C. Elitzur and Lev Vaidman In *Foundations of Physics*. Vol 23. No. 7. Pages 987-997; July 1993.

INTERACTION-FREE MEASUREMENT. P. G. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger and M. A. Kasevich in *Physical Review Letters*. Vol. 74. No 24. Pages 4763-4766; June 12. 1995.

Discussion on Experiments for Interaction-Free Measurements Can Be Found on the World Wide Web At http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/#Inter and at http://p23.lanl.gov/Quantum/Kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm.



الجاذبية الكمومية

في نظرية الميكانيكا الكمومية[1] للجاذبية قد تتعرض هندسة الفضاء والزمن ذاتها لترجُحات مستمرة، حتى إن التمايُز بين الماضي والمستقبل قد يصير ملموساً.

(ب.س. دويت)

يبدو أن للجاذبية وضعاً خاصاً بين قوى الطبيعة كلها. فغيرها من القوى كالقوة الكهرمغنطيسية مثلاً، يقوم فعلها في الحيِّز الزمكاني[2]، الذي يشكل بالنسبة لها مجرد مسرح تجري عليه أحداث الطبيعة. أما قوة الجاذبية فإن وضعها مختلف تماماً. فهي ليست قوة خارجية مفروضة على خلفية جامدة من الفضاء والزمن، بل على العكس فهي تُشكِل اعوجاجاً في الحيز الزمكاني نفسه. فحقل الجاذبية هو (تقوّسٌ) Curvature في الزمكان. هذا هو مفهوم الجاذبية الذي توصل إليه «أينشتين» والذي اعتبره أصعب إنجاز قام به في حياته.

ويتبدى هذا التمايز النوعي بين الجاذبية وغيرها من قوى الطبيعة بوضوح أكثر إذا ما حاولنا صياغة نظرية للجاذبية تتلاءم مع مبادئ الميكانيكا الكمومية. فالعالم الكمومي لا يهدأ أبداً. وعلى سبيل المثال ففي نظرية الحقول الكمومية للقوة الكهرمغنطيسية يترجّح قدْر الحقل الكهرمغنطيسي بصورة مستمرة. ففي كَوْنٍ تحكمه الجاذبية الكمومية فإن تقوُس الحيِّز الزمكاني وحتى بنيته ذاتها يخضعان للترجُح، وإنه لأمر ممكن تماماً أن يُصبح توالتر الأحداث في الطبيعة وكذلك مفهومنا للماضي وللمستقبل عرضة للتغيُر.

وقد يقول قائل إنه لو كانت هناك ظواهر طبيعية كهذه فمن المفروض أن نكون قد شاهدناها حتى الآن. ولكن حقيقة الأمر أن أي أثر للجاذبية يصدر مباشرة عن خواصها الكمومية، يتبدّى على نطاقٍ ذي مقاس متناهٍ في الصغر. وكان (م. بلانك) Max Plank أوّل من نبّه إلى هذا المقاس في عام 1899. ففي ذلك العام اكتشف «بلانك» الثابتَ الشهير الذي يحملُ اسمه والمسمى بـــ«كَم (كَنْتَم) الفعل» والذي يحمل الرمز h. وقد كان ذلك في سياق صياغته للنظرية التي فسرت خواص طيف الإشعاع الصادر عن جسم أسود. ونعني بذلك الإشعاع الذي يخرج من ثُقب صغير في جدار تجويف ساخن. ففي ملاحظة جانبية وجّه «بلانك» الانتباه إلى أنه إذا أُخذ ثابته بالحُسبان إضافةً إلى سرعة الضوء وثابت الجاذبية لنيوتن يصبح بالإمكان التوصل إلى نظام مطلق لوحدات القياس. وهذه هي الوحدات التي تحدد مقاس الجاذبية الكمومية.

ووحدات «بلانك» هذه لا علاقة لها البتّة بالفيزياء التي نعهدها. وعلى سبيل المثال فإن قدْر وحدة الطول حسب نظام «بلانك» هو 1.61×10^{-33} سنتيمتراً، وإذا قارنا هذا البعد بقطر نواة الذرة تكون نسبته كواحد إلى عشرة أُس 21 وبصورة تقريبية يمكننا القول: إن نسبة هذه الأبعاد إلى أبعاد النواة تعادل نسبة حجم الإنسان إلى حجم المَجرة. أما وحدة الزمن في نظام بلانك فهي أشد إيغالاً في خياليتها: إذ يبلغ قدرها 5.36×10^{-44} ثانية. وكي نستكشف آفاق مقاسات المسافة والزمن هذه سنكون بحاجة إلى مُسرِّع للجُسيمات يكون بحجم المَجرة!.

ولما كانت التجربة العملية غير قادرة على هدايتنا في هذا المجال، فقد ارتكزت الجاذبية الكمومية بدرجة غير معهودة على التخيُّل. ومع هذا فإنها تبقى في جوهرها (محافظة) Conservative بصورة أساسية، وذلك لأنها تأخذ نظريات قائمة، والأدلة على صحتها وافرة ثم تذهب بها إلى نهاياتها المنطقيّة. فإذا نحن جرّدناها إلى بُنيتها الأساسية، أمكننا القول إن الجاذبية الكمومية تسعى إلى تشييد بنيان نظري على دعائم ثلاث:

1- نظرية النسبية الخاصة.

2- نظرية أينشتين للجاذبية.

3- النظرية الكمومية.

ومع أن التوفيق بين هذه النظريات الثلاث لما يتم، إلاّ أننا قد استفدنا الكثير من نتائج الجهد الذي بذله العلماء في هذا السبيل. ثم إن تطوير نظرية عملية للجاذبية الكمومية يفتح أمامنا الطريق الوحيد المعروف لفهم بداية الانفجار الأولي والنهاية القصوى للثقوب السوداء، وهما الحدثان اللذان يمكن اعتبارهما مميِّزين لبداية الكون ولنهايته.

ومن بين هذه النظريات الثلاثة التي تُكَوِّن روافد الجاذبية الكمومية، كانت نظرية النسبية الخاصة أولها في الظهور. فهي النظريـــة التــي توحِّد الفضاء والزمـــن عبـــر الفرضية ــ المثبتة

---

[1] ويقال أيضاً «كَنْتَمية» أو «كوانتية» quantum.

[2] نسبة إلى «الزمكان» وهذه الكلمة نحت من «زمان ــ مكان» space-time ويقال أيضاً «الفضاء زَمني».

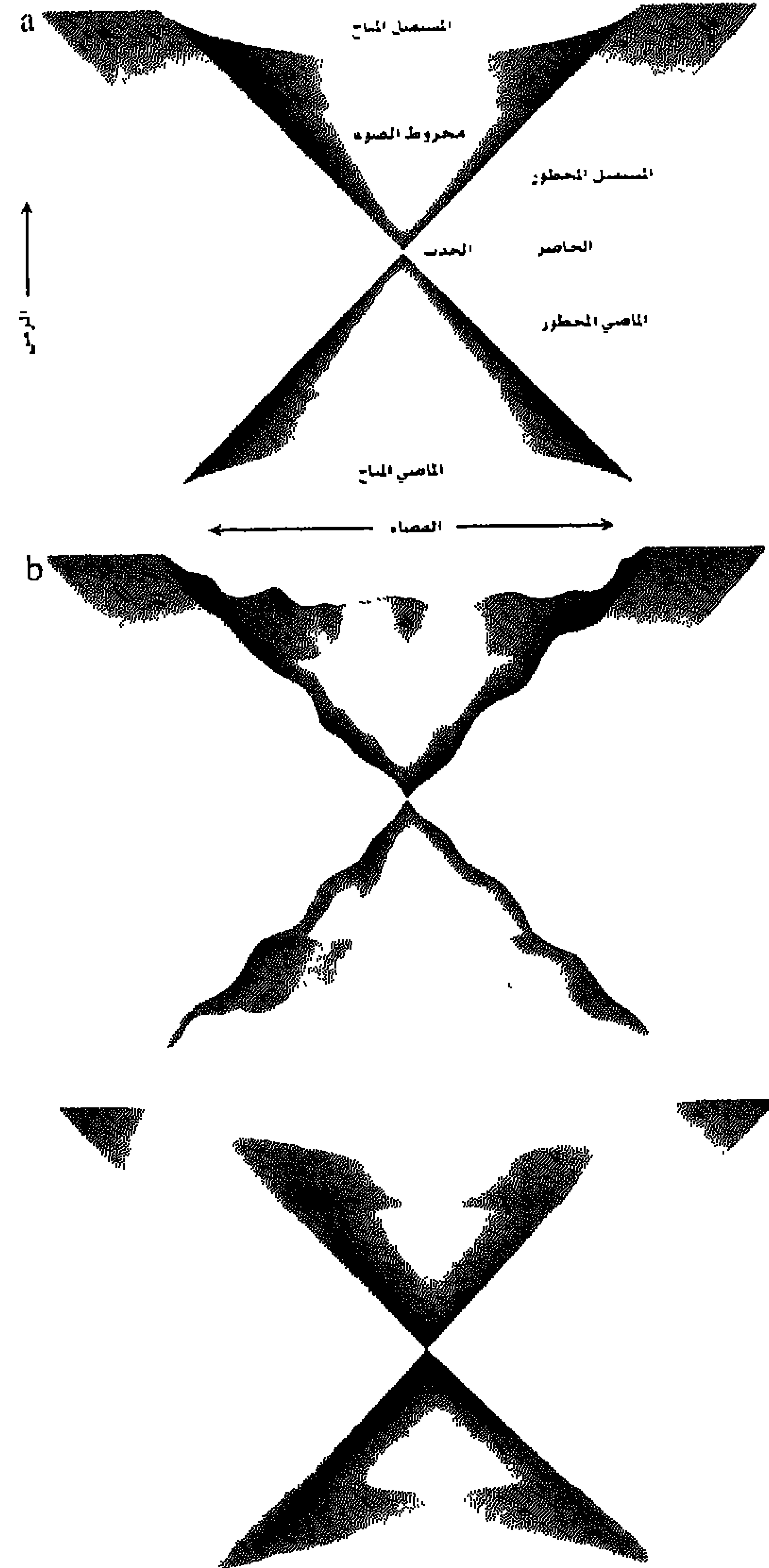
بالتجارب ــ والقائلة بأن قياس سرعة الضوء سيكون واحداً لدى جميع المشاهدين الذين يسيرون في الفضاء الخالي، دون أن يكونوا عرضة لتأثير قوى خارجية. ولقد أدخل أينشتين هذه النظرية، في علم الفيزياء عام 1905، وبالإمكان إظهار نتائجها عبر مُخطّط زمكاني تُرسم عليه منحنيات تمثل موضع الأجسام في الفضاء كدالة تعتمد على الزمن، وتسمى هذه المنحنيات (خطوطاً عالمية) World Lines.

وتبسيطاً للشرح سوف نُهمل في هذا المقام اثنين من أبعاد الفضاء، وفي هذه الحال يصبح بالإمكان رسم خط عالمي على مخطّط ذي بعدين بحيث تقاس المسافة في الفضاء بالبُعد الأفقي، وتقاس الفترة من الزمن بالبعد الشاقولي. فإذا أخذنا خطاً شاقولياً فإنه سيُمثل الخط العالمي لجسم ساكن في (إطار الإسناد «المرجع») Frame of Seference الذي اخترناه للقياس، أما إذا أخذنا خطاً مستقيماً مائلاً فإنه سيُمثل جسماً يسير بسرعة ثابتة في إطار ذلك الإسناد، وأما إذا أخذنا خطاً منحنياً فإنه سيُمثل جسماً متسارعاً.

وتحدد النقطة على المُخطط الزمكاني موضعاً في الفضاء إضافة إلى لحظة من الزمن وهي تسمى (حَدَثاً) Event. أما المسافة في الفضاء بين حَدَثين فإن قدرها يعتمد على الإطار الذي نختار، وكذلك الحال بالنسبة للمدّة الزمنيّة بينهما. وفي الواقع فإن مفهوم التّزامن نفسه يتوقف على الإطار، فكل حَدَثين واقعين على خط أفقي في إطار ما، يكونان متزامنين في ذلك الإطار، ولكنهما لن يكونا كذلك في أُطر أخرى.

ولإيجاد علاقة تربط ما بين أطر تتحرك فيما بينها فإن علينا أن نُدخل وحدةً واحدة لقياس كل من الفضاء والزمن. وهذا يتم لنا عبر استعمال سرعة الضوء كعامل تحويل يربط ما بين مسافة معينة والزمن الذي يستغرقه الضوء لقطعها. وسوف نأخذ المتر وحدةً لقياس كل من الفضاء والزمن. وفي هذه الحال سيبلغ قدر متر واحد من الزمن 3⅓ نانو ثانية (نانو ثانية تساوي واحداً على بليون من الثانية).

ولدى قياس الفضاء والزمن بوحدة القياس نفسها سيكون ميل الخط العالمي للفوتون (وهو كمّ الضوء) عن الخط الشاقولي العمودي بقدر 45°، أما ميل الخط العالمي لجسم مادي عن الخط الشاقولي فسيكون أقل من 45°. وهذا يعني أن سرعته أقل من سرعة الضوء. أما إذا مال خط عالمي يمثل جسماً أو إشارة أكثر من 45 عن الخط الشاقولي فسيبدو هذا الجسم أو تلك الإشارة لمشاهدين معينين وكأنه يسير القهقرى في الزمن. وفي هذه الحالة سيتمكن المرء عبر إقامة شبكة اتصال من إشارات تفوق سرعتها سرعة الضوء من إرسال معلومات إلى ماضيه. وهذا أمر يتناقض مع قاعدة السّببية، لذلك فإن وجود إشارات من هذا النوع أمر تحظره نظرية النسبية الخاصة.



مخروط الضوء: إن هذا الشكل يُعيّن نواحي الكون التي يُمكن بلوغها من نقطة معينة في الفضاء ومن لحظة معينة في الزمن، يصبح مفهوماً غير محدد في نظرية الجاذبية الكمومية. ويبين الشكل (a) المخروط وهو يكوّن سطحاً في زمكان رباعي الأبعاد غير أننا نرى هنا بعدين فقط من أبعاد الفضاء الثلاثة (بغية سهولة تصوُّره). فإذا كانت الجاذبية (مكمّاة) Quantized فإن شكل المخروط يبدأ بالترجُّح بعنف فوق مسافات قصيرة الشكل (b). غير أنه ليس بالإمكان مشاهدة هذه الترجُّحات بصورة مباشرة. أمّا ما يحدث فهو أن المخروط سيبدو غير واضح المعالم. ونتيجة لذلك فلن يكون بالإمكان معرفة ما إذا كان الاتصال (بواسطة إشارات سرعتها دون سرعة الضوء) بين نقطتين في الزمكان ممكناً إلاّ بصورة احتمالية.

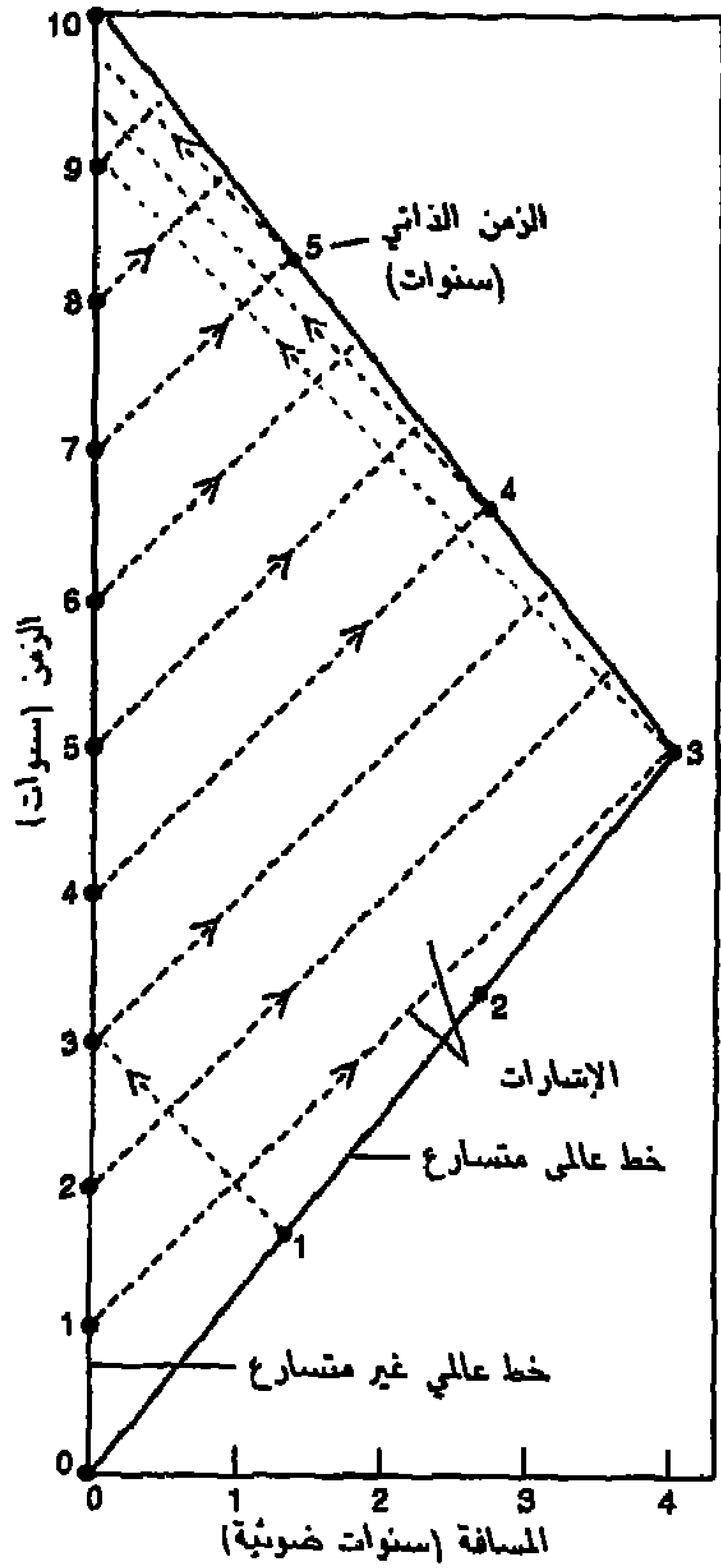
نعتبر الآن حدثين على الخط العالمي لمشاهد غير خاضع لتسارع، ولنفترض أنه في إطار إسناد معين يفصل بين هذين الحدثين أربعة أمتار من الفضاء وخمسة أمتار من الزمن. وهذا يعني أن سرعة المشاهد في هذا الإطار هي أربعة أخماس سرعة الضوء. وإذا ذهبنا إلى إطار إسناد آخر فإن سرعة المشاهد ستتغير، كما سيتغير أيضاً ما يفصل بين الحدثين من مسافة في الفضاء ومن مدة في الزمن. إلاّ أن هناك كمية واحدة تحتفظ بقيمتها في جميع «أُطر الإسناد». وهذه الكمية التي لا تتغير من إطار إلى آخر تسمى (الزمن الذاتيّ) Proper Time بين الحدثين، وهي مساوية للمدة الزمنية حسب ما يسجلها المشاهد على ساعة يحملها معه.

وفي الإطار مدار البحث يُشكل الخط العالمي بين الحدثين وترَ مثلث قائم الزاوية طول قاعدته أربعة أمتار وارتفاعه خمسة أمتار. ويعادل الزمن الذاتي «طول» هذا الوتر، إلاّ أنه يحسب بطريقة غيراعتيادية، وذلك بواسطة نظرية «فيثاغوريّة زائفة». فنحن نبدأ بتربيع الضلعين كما هي الحال في نظرية فيثاغورس الاعتيادية. أما حسب نظرية النسبية الخاصة فإن تربيع الوتر يساوي ناتج طرح تربيع الضلعين لا ناتج جمعهما.

وفي مثالنا الحالي يساوي قدر الزمن الذاتي ثلاثة أمتار. وهو يحتفظ بقيمته هذه في إطار إسناد (أي مشاهد) لا يخضع لتسارع، وعدم تغير الزمن الذاتي هذا هو الذي يجمع بين الفضاء والزمن في كيان واحد هو الزمكان. وبما أن هندسة الزمكان تقوم على نظرية فيثاغورية زائفة فهي ليست هندسة إقليدية بل هي هندسة مشابهة لها. ففي هندسة إقليدس يمكن تعريف الخط المستقيم بأنه ذلك الخط الذي يتميز ــ من بين جميع الخطوط التي تصل بين نقطتين ــ في أن طوله يبلغ قيمة قصوى. ويسري هذا التعريف أيضاً على هندسة الزمكان. وفي هندسة إقليدس، فإن القيمة القصوى هي دوماً القيمة الصغرى. أما في حالة الهندسة الزمكانية فهي تكون القيمة العظمى مادام بالإمكان وصل النقطتين بخط عالمي لا يقتضي التنقل بسرعة تفوق سرعة الضوء.

وفي عام 1854 وضع عالم الرياضيات الألماني (ريمان) G.F.B Riemann تعميماً لهندسة إقليدس يسري على الفضاءات المتقوّسة. وتجدر الإشارة إلى أن الفضاءات المتقوسة ذات البعدين قد كانت موضع دراسة منذ العصور القديمة. وهي تسمى بالسطوح المتقوّسة، وتتم معالجتها عادة ضمن منظور الفضاء الإقليدي العادي ذي الأبعاد الثلاثة. وقد بيّن «ريمان» أنه يمكن أن يكون للفضاء المتقوّس أي عدد من الأبعاد، وأنه يمكن له أن يُدرس بحد ذاته. أي أنه ليس بحاجة إلى أن نتخيله مزروعاً في فضاء إقليدي يربو عليه بعدد أبعاده.

وقد أشار «ريمان» أيضاً إلى احتمال كون الفضاء الطبيعي الذي نعيش فيه متقوساً، وقد كان رأيه أن هذا الأمر لا يمكن البتّ فيه إلا عبر التجربة ولكن كيف يمكن لنا أن نقوم بمثل هذه



الخط العالمي يبين مساراً في الفضاء والزمن نرى في هذا الشكل خطين عالميين يُمثلان إحدى صيغ تناقض التوأمين لأينشتين. ويمثل الخط المنحني مسار التوأم المتسارع. وهو يتعرض للتسارع عند النقطة التي يستدير فيها بغية العودة. وعلى الرغم من أن خطه يبدو الأطول إلا أنه يسجل زمناً ذاتياً أقل من ذلك الذي يسجله قرينه. فالخط المستقيم يمثل أطول امتداد بين نقطتين في شكل زمكاني. ويرى في الشكل أيضاً أوقات إرسال واستقبال الإشارات بين التوأمين.

التجربة، ولو من ناحية نظرية؟ إن الفضاء الإقليدي يدعى الفضاء المنبسط. ومن خواص الفضاء المنبسط انه بالإمكان أن نرسم فيه خطوطاً مستقيمة ومتوازية بحيث تشكل شبكة مستطيلات منتظمة. فماذا يمكن أن يحدث لو أننا حاولنا رسم مثل هذه الشبكة على سطح الأرض متوهمين أنها منبسطة؟

إن نتيجة ذلك يمكن رؤيتها من الجو في أي يوم صاف فوق منطقة السهول العظمى في ريف الولايات المتحدة الأمريكية. فالأراضي هناك تقسم إلى مربعات بمساحة ميل واحد للمربع، وذلك بواسطة شبكة طرق تمتد شمالاً ــ جنوباً، وشرقاً ــ غرباً، . وفي معظم الحالات فإن الطرق المتجهة شرقاً ــ غرباً تمتد أميالاً عديدة بدون تقطُع، بعكس الطرق المتجهة شمالاً ــ جنوباً، فإذا تتبعنا هذه الطرق بنظرنا فسرعان ما نجدها تصل إلى نقطة بعد كل بضعة أميال تنزاحُ فيها فجأة نحو الشرق أو نحو الغرب. وهذا الانزياح يفرضه تقوُس الأرض، ولولاه لبدأت الطرق بالتقارب مشكلة قطعاً تقل عن ميل مربع في مساحتها.

أما في حالة فضاء ذي أبعاد ثلاثة فبإمكاننا أن نتخيل تركيب سقالة مترامية الأطراف، مكونة من قضبان مستقيمة ومتساوية الطول. وهذه القضبان تترابط بعضها ببعض مشكلة بكل دقّة زوايا قدرها °90 أو °180. فإذا كان الفضاء منبسطاً فإن تركيب السقالة

يسير قدماً دون أي صعوبة. أما إذا كان الفضاء متقوّساً فنصل إلى مرحلة يكون علينا فيها أن نقصّر القضبان أو أن نطوّلها كي تنتظم في أماكنها.

إن التعميم نفسه الذي وضعه «ريمان» لهندسة إقليدس يمكن تطبيقه على هندسة النسبية الخاصة. وهذا ما قام به «آينشتين» بين عام 1912 وعام 1915، بمساعدة العالم الرياضي (م.هـ. كروسمان) Marcel H. Grossmann. أما النتيجة فهي نظرية زمكان متقوس. وبجهود آينشتين تم تطوير هذه إلى نظرية للجاذبية. وتفترض نظرية النسبية الخاصة غياب حقل الجاذبية، ولذلك فإن الزمكان يكون منبسطاً في هذه الحال. أما في الزمكان المتقوس فحقل الجاذبية موجود؛ وفي الواقع فإن «التقوّس» و«الحقل الجاذبي» أمران مترادفان.

ولما كانت النظرية التي وضعها آينشتين لحقل الجاذبية تعميماً لنظرية النسبية الخاصة، فقد أطلق عليها اسم «النسبية العامة» General Relativity، إلاّ أن هذه التسمية ليست موفقة في الواقع. فالنسبية العامة هي في حقيقة الأمر أقل نسبية من النسبية الخاصة. وذلك لأن الانعدام التام للمعالم في الزمكان المنبسط وتجانسه في البعد وفي الاتجاه إنما تُشكل الخواص التي تضمن الطبيعة النسبية للمواضيع وللسُرُعات. وحالما يكتسب الزمكان «حِداباً» أو مناطق محلية التقوس فإنه يصبح مطلقاً، لأنه يصبح بالإمكان تحديد الموضع والسرعة بالنسبة لهذه الحداب. وهكذا فبدل أن يكون الزمكان مجرد حلبة معدومة المعالم للفيزياء، يصير هو نفسه متميزاً بخواص فيزيائية.

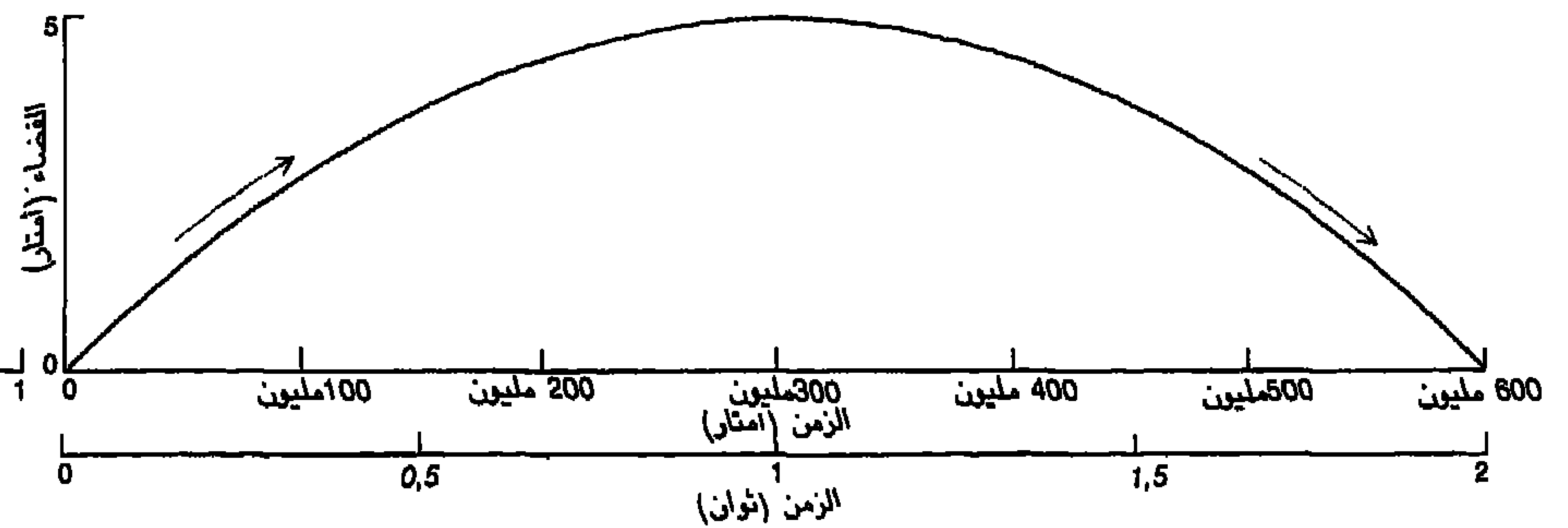
وحسب نظرية آينشتين فإن التقوس ينتج عن المادة. والعلاقة بين كمية المادة ودرجة التقوس بسيطة مبدئياً إلاّ أن حسابها أمر معقد. فلكي نحدد التقوّس على نقطة من الزمكان، فإننا بحاجة إلى معرفة عشرين دالة تعتمد كل منها على إحداثيات تلك النقطة.

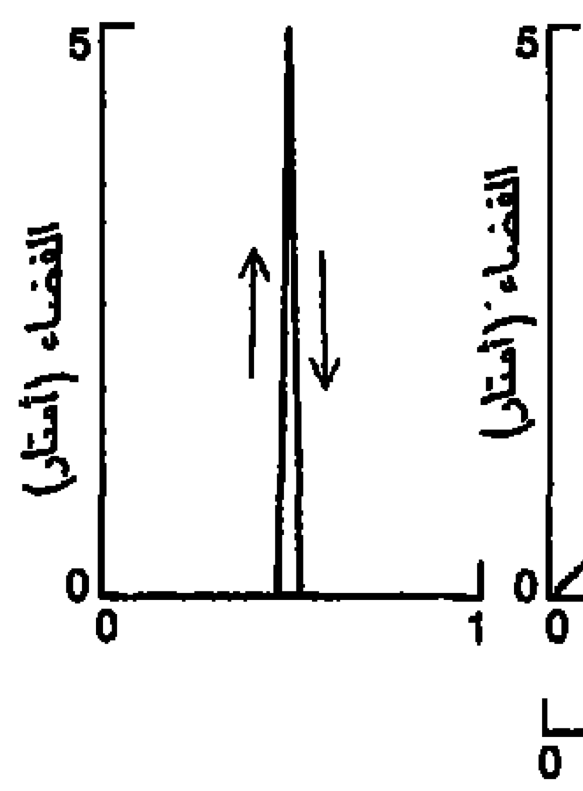
وتمثل عشر من هذه الدالات جزءاً من التقوّس ينتشر طليقاً على هيئة موجات جاذبية أو «مُوَيجات تقوُسيَّة». أما الدالات العشر الباقية فإنها تتحدَّد عبر توزع كل من الكتلة والطاقة والزخم والعزم الزاوي والجهد الداخلي في المادة وكذلك ثابت نيوتن للجاذبية G.

ونسبة إلى كثافات الكتلة التي نعهدها على الأرض، فإن G ثابت صغير جداً. ولا بدَّ من توفر الكتلة بكميات كبيرة، كي تتمكن من تقويس الزمكان بدرجة ملحوظة. فالكمية المعكوسة $1/G$ يمكن اعتبارها مقياس «صلابة» الزمكان. وقياساً على خبرتنا اليومية فإن الزمكان صلب للغاية. فالتقوس الزمكاني الناتج عن كتلة الأرض بأكملها لا يتجاوز واحداً بالبليون من تقوس سطح الأرض.

وتبعاً لنظرية آينشتين فإن مسار جسم ساقط بطلاقة على جرم سماوي أو سائر بطلاقة في مدار حوله إنما يكون خطاً عالمياً قياسياً. ويُعرَّف الخطُّ القياسي الذي يصل بين نقطتين زمكانيتين بذلك الخط العالمي بينهما، الذي يكون طوله ذا قيمة قصوى. فهو يشكل تعميماً لمفهوم الخط المستقيم. وإذا تصورنا زمكاناً متقوّساً مزروعاً في فضاء منبسط يفوقه بعدد أبعاده فإن الخط القياسي سيبدو منحنياً.

وكثيراً ما يستغل نموذج كرة تتدحرج على سطح معوجٍّ من المطاط المشدود بغية توضيح أثر التقوّس على جسم متحرك. وهذا نموذج مُضلِّل ـ بالواقع ـ من حيث أنه لا يمكن أن يمثل إلاّ التقوس الفضائي. أما في الطبيعة فإننا ملزمون بالعيش في كون الفضاء والزمن ذي الأبعاد الأربعة. وفي هذا الكون لا نستطيع التوقف عن الحركة، إذ إننا نمضي قُدُماً مُعجِّلين في الزمن، فالزمن هو العامل الأساسي. وهكذا تكون النتيجة أنه بالرغم من تقوس الفضاء في حقل الجاذبية فإنَّ تقوس الزمن يطغى عليه بالأهمية. وأما السبب في ذلك فيعود إلى ارتفاع قدْر سرعة الضوء أي قدر نسبة مقاس الفضاء إلى مقاس الزمن.





تقوُّس الزمكان: بوجود كتلة ما يكون حقل الجاذبية. وإذا دفعنا بكرة إلى علو خمسة أمتار (الشكل الأيسر) فإنها تمكث في الهواء مدة ثانيتين. وتبين حركتها صعوداً ثم هبوطاً تقوُّس الزمكان بالقرب من سطح الأرض. وتقوُّس مسار الكرة يظهر بوضوح. ولكنه يصبح ضئيلاً للغاية عندما نستعمل وحدات القياس نفسها للفضاء وللزمن، فالثواني يمكن تحويلها بأن نضربها بسرعة الضوء والتي تساوي 300 مليون متر في الثانية. وبذلك يصبح القوس ضحلاً للغاية ويكون طوله 600 مليون متر وارتفاعه خمسة أمتار (الشكل الأيمن). والارتفاع الذي نراه في الشكل هو أطول بكثير مما هو في الواقع.

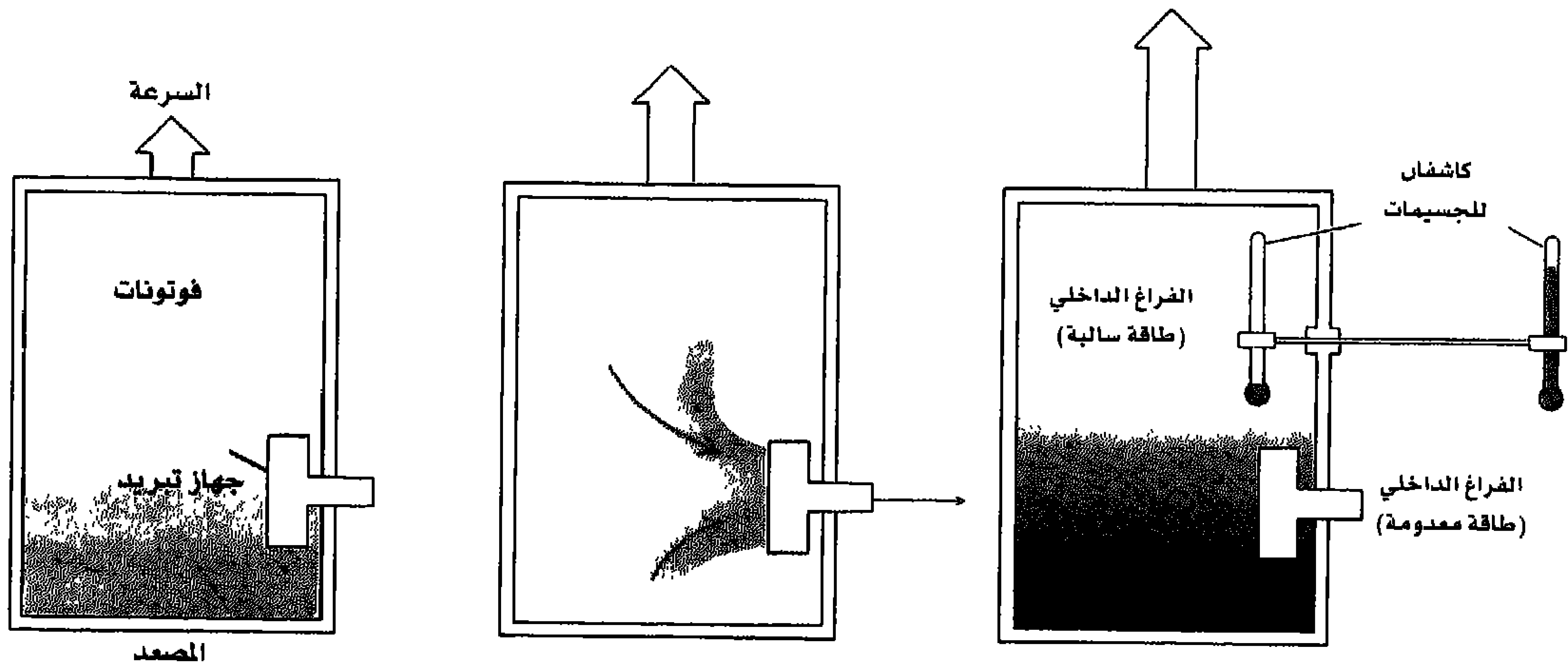
ويكون تقوس الفضاء على مقربة من الأرض ضئيلاً لدرجة لا يمكن معها تبيّنه عبر قياسات تستغل أجساماً في حالة السكون. إلاّ أنّ اندفاعنا في الزمن هو من السرعة بمكان بحيث أن التقوس يغدو ملحوظاً في الأوضاع الديناميكية، تماماً مثل حدب طفيف في أرض حلبة سباق للسيارات لا يلاحظ من قبل مترجل، في حين أنه يشكل خطراً جسيماً على السيارات المنطلقة بسرعة.

وعلى الرغم من أن الفضاء بالقرب من الأرض يبدو منبسطاً لدرجة عالية من الدقّة إلا أن بإمكاننا مشاهدة تقوُس الزمكان بمجرد أن نرمي كرة عالياً. فإذا استغرق صعود الكرة وهبوطها ثانيتين من الزمن فإنها ستتبع في حركتها قوساً بارتفاع خمسة أمتار. وفي هاتين الثانيتين يقطع الضوء مسافة 60000 كلم. فلو أنّنا تخيّلنا هذا القوس بأمتاره الخمسة وقد مططناه أفقياً بحيث يبلغ طوله 600000 كلم، فسيكون تقوُسه حينئذ مساوياً لتقوُس الزمكان.

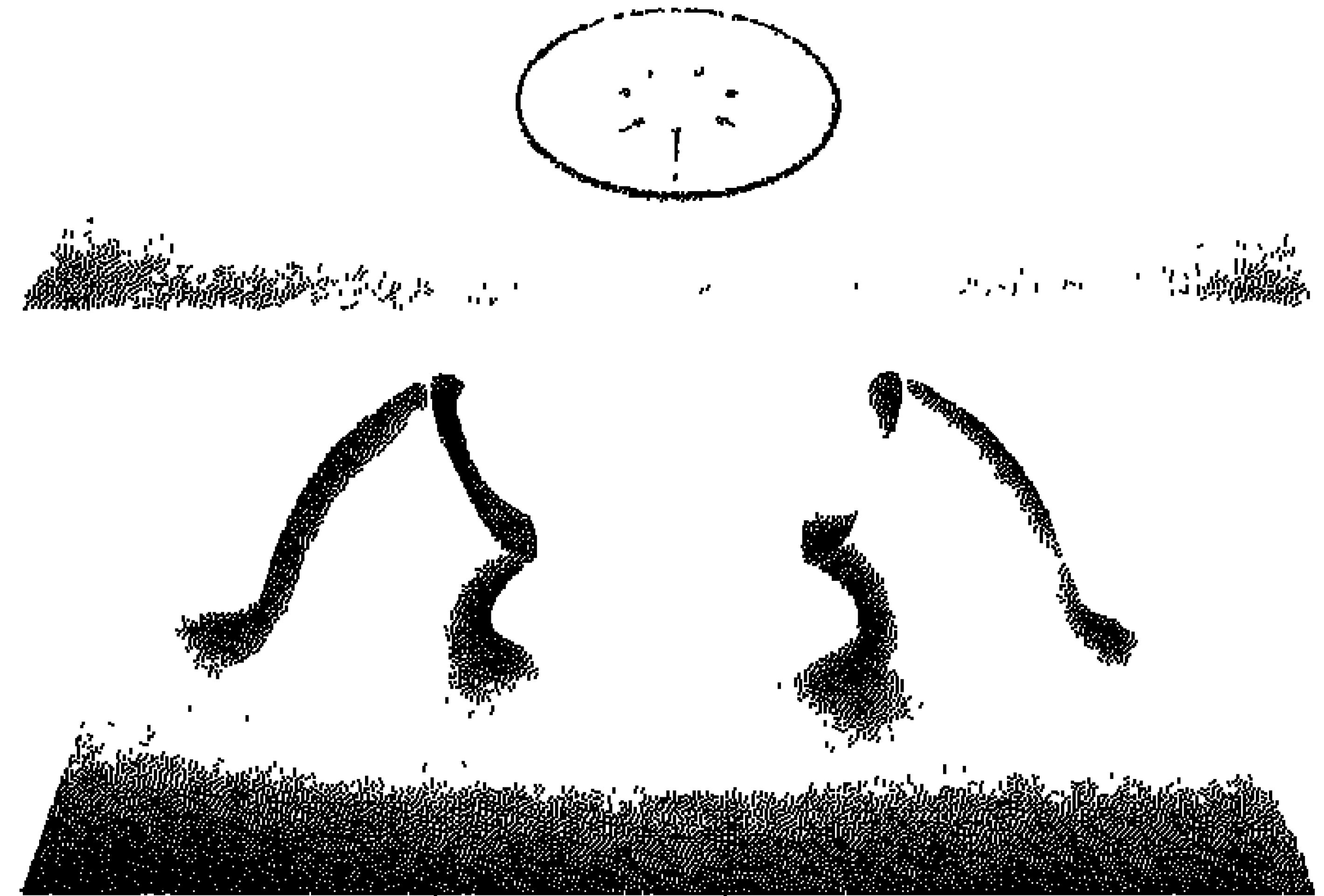
ولقد أدى مفهوم الفضاءات المتقوسة الذي أدخله «ريمان» إلى افتتاح حقل آخر خصب للرياضيات ألا وهو حقل التوبولوجيا. فقد عرف الرياضيون وصنّفوا أنواعاً لا حصر لها من السطوح ثنائية الأبعاد معدومة الحدود، والتي لا يمكن عجنُها بصورة متصلة بحيث نحوّل أحدها إلى هيئة الآخر. ويمكن أن نوضح ما نقول بمثالين بسيطين وهما: الكرة والحلقة. وقد أشار «ريمان» إلى أن الأمر نفسه ينطبق على الفضاءات المتقوّسة متعددة الأبعاد. كما أنه خطا الخطوات الأولى نحو تصنيفها.

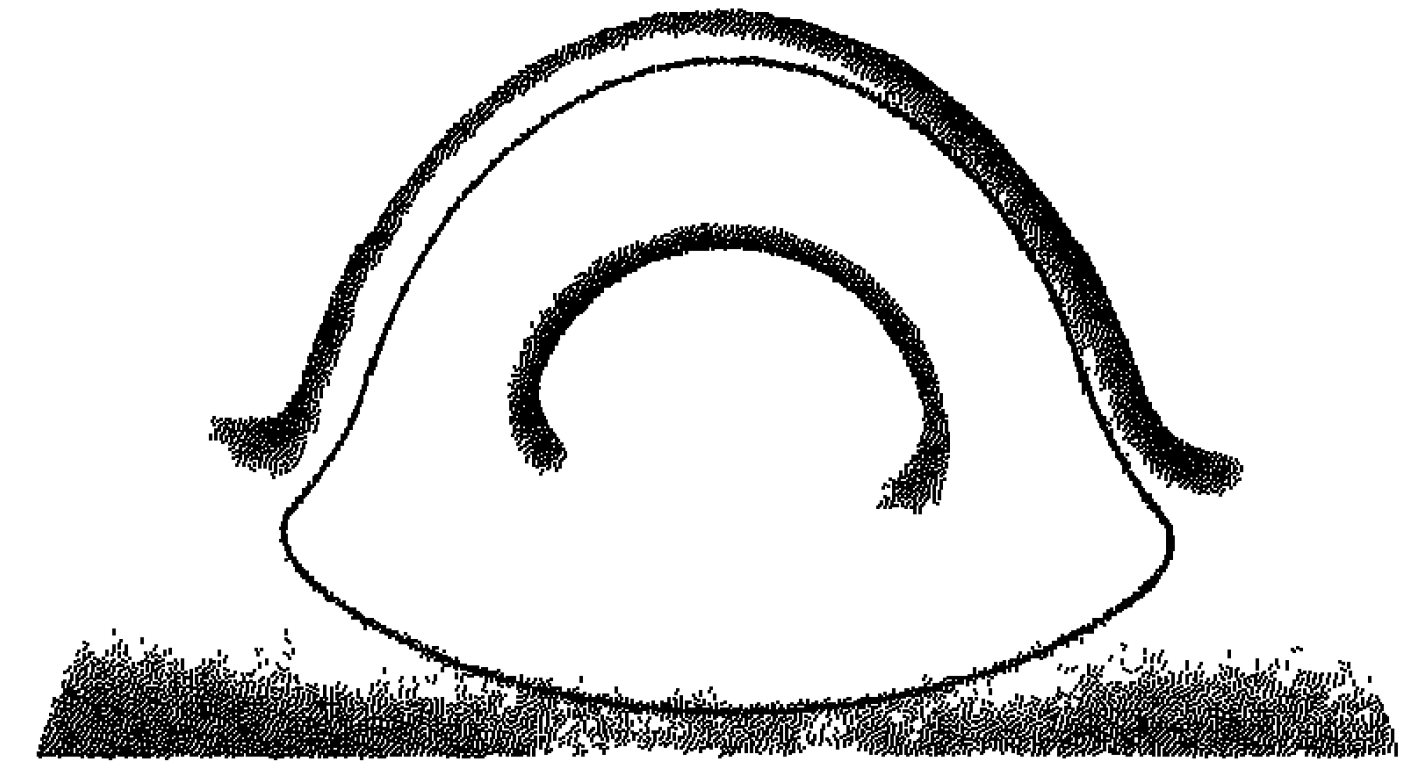
وتأتي الزمكانيات المتقوّسة أيضاً (أو نماذج لها) على أنواع مختلفة لا حصر لها. وبعض هذه الأنواع لا يمكن القبول بها كنماذج محتملة لوصف الكون الواقعي، وذلك إما لأنها تقود إلى تناقضات سببيّة أو لعدم تمكلها من استيعاب قوانين طبيعية مألوفة، وفي هذه الحالة يمكننا حذفها. ومع هذا يبقى هناك عدد هائل من الخيارات المحتملة.

ولقد اقترح العالم الرياضي الروسي (أ.أ. فريدمان) Alexander A. Friedmann واحداً من النماذج المشهورة للكون وذلك في عام 1922. ففي نظرية النسبية الخاصة، لا يعتبر الزمكان منبسطاً فقط بل إن امتداده في الفضاء وفي الزمن يؤخذ على أنه غير متناه. أما في نموذج «فريدمان» فإن أي مقطع عرضي فضائي ثلاثي الأبعاد من الزمكان يكون ذا حجم محدود، ويتّسم بتوبولوجيا الفضاء المسمى بفضاء الكرة الثلاثية. وهو فضاء ثلاثي الأبعاد، وبالإمكان غرسه في فضاء إقليدي رباعي الأبعاد، بحيث تكون كل نقطة منه على المسافة نفسها من نقطة معينة. ومنذ أن اكتشف (إ.ب. هَبل) Edwin P. Habble توسع الكون في العشرينيات فقد أصبح هذا هو النموذج المفضل من قِبل علماء الكون. وعندما نجمع بين نموذج «فريدمان» ونظرية الجاذبية لـــ«آينتشتاين تكون النتيجة استنباط وقوع «انفجار عظيم» Big Bang في لحظة بدء انضغاط بلا حدود، يعقبه توسع ما يلبث أن يأخذ بالتباطؤ عبر بلايين السنين من جرّاء تجاذب المادة كلها في الكون.



المصعد المتسارع وهو يشكل جهازاً لتجربة تخيُّلية تتعلق بطبيعة الفراغ في الميكانيكا الكمومية وبتأثير التسارع أو الجاذبية على الفراغ. نبدأ بالمصعد فارغاً ومحكم الإغلاق بحيث يسود فراغ تام في داخله وفي خارجه. عند بدء التسارع تنبعث موجة كهرمغنطيسية من أرض المصعد فتملؤه بغاز غير مضغوط من الفوتونات. أي من كموم الإشعاع الكهرمغنطيسي (الشكل الأيسر). ويقوم جهاز تبريد يعمل بطاقة يتزود بها من الخارج بضخ هذه الفوتونات إلى خارج المصعد (الشكل الأوسط). وبعد أن يتم ضخ جميع الفوتونات إلى الخارج يقوم كاشفان للفوتونات بقياس طاقة الفراغ داخل المصعد وخارجه (الشكل الأيمن). ولما كان الكاشف الخارجي يتسارع عبر الفراغ فإنه يتفاعل مع الترجُحات الميكانيكية الكمومية للحقول التي تملأ الفضاء حتى في غياب الجسيمات. أما الكاشف الداخلي فهو ساكن في المصعد ولذلك فهو لا يكشف أية ترجُحات. إذن فالفراغ داخل المصعد لا يعادل الفراغ خارجه. فإذا عرّفنا الفراغ الخارجي بأنه ذو طاقة معدومة، وجب أن تكون طاقة الفراغ الداخلي سالبة. فإذا أردنا أن نرفع قيمتها إلى الصفر وجب أن نعيد الفوتونات التي ضخخناها إلى الخارج. وبالإمكان توليد فراغ ذي طاقة سالبة عبر حقل الجاذبية أيضاً.





النفق النَّخر في الزمكان هو تكوين وهمي بمقدوره تغيير توبولوجية الكون. وكي نُكوِّن نفقاً نخراً على سطح منبسط نقوم بثقبه بفتحتين ثم نَمُطّ محيطيهما بحيث يشكلان أنبوبين، ومن ثم نعمد إلى وصل هذين الأنبوبين، ويكون بإمكاننا تقليص أي منحنٍ كامل التواصل على السطح الأصلي إلى أن يجتمع في نقطة (الخط الملون). إلاّ أن هذا غير ممكن لمنحنٍ يمر بنفق نخر. كما أنه ليس هناك من فرق في المفهوم بين نفق نخر في فضاء ثلاثي الأبعاد وآخر في فضاء رباعي الأبعاد.

ويتميز زمكان «فريدمان» بالخاصيَّة الآتية: إذا أخذنا فيه أي منحنٍ مغلق، فسيكون بالإمكان تقليصه بصورة متواصلة إلى أن يتضاءل إلى نقطة، ويسمى الفضاء الذي يتميز بهذه الخاصية فضاء بسيط الترابط، إلاَّ أن هذه الخاصيَّة قد لا تنطبق على الكون الواقعي. ومهما يكن من أمر، يبدو أن نموذج «فريدمان» يوفر وضعاً جيداً للغاية لتلك الناحية من الفضاء التي تحيط بمجرّتنا إلى عمق بضعة بلايين من السنين الضوئية. إلا أنه يجب أن نتذكر أننا لا نستطيع رؤية الكون بكامله.

ونَصِفُ الآن مثالاً للكون مركب الترابط. فلنتأمل كوناً يتكرر بُنيانه بدون انقطاع في اتجاه فضائي معين، مثل تكرر النمط على الأوراق التي تزيَّن بها جدران البيوت. فكل مجرة في هذا الكون ما هي إلاَّ حلقة في سلسلة غير متناهية من مجرات متطابقة تفصل بينها مسافة معينة (وشاسعة بالطبع). وإذا كانت حلقات السلسلة متطابقة حقاً فإنه من المقبول أن نتساءل عن جدوى اعتبارها مختلفة. وسيكون أكثر مدعاة للإيجاز أن نعتبر أن كل سلسلة تُمثِّل مجرة واحدة. فإذا قمنا برحلة تنقلنا من حلقة في هذه السلسلة إلى الحلقة التي تليها فإننا نكون قد عُدنا إلى نقطة البداية. وإذا رسمنا خط سيرنا في هذه الرحلة فإنه سيكون منحنياً كامل التواصل ولكن لن يكون بإمكاننا تقليصه إلى نقطة. وهو شبيه في هذا بخط كامل التواصل على سطح أسطوانة وملتفٍ مرة واحدة حولها، ولهذا فالكون المتكرر يُدعى بالكون الأسطواني.

ونورد مثالاً لبُنيةٍ مركبة الترابط ولكنها ذات مقاس أصغر، ولقد أدخل هذه البنية عام 1957 (ج.أ. ويلر) J. A. Wheeler الأستاذ حالياً في جامعة «تكساس» في مدينة «أوستن»، وسمَّاها «النفق النَّخِر»؛ لأنها تتكون من أنابيب تشبه الأنفاق في عَظْمةٍ نَخِرة. ويمكننا تكوين نفق ثنائي الأبعاد، بأن نخرُق فجوتين بسطح متصل صقيل (انظر الشكل إلى اليمين) ويمكن اتباع الطريقة نفسها في حالة فضاء ثلاثي الأبعاد، إلاَّ أن تصورها يكون أكثر صعوبة.

وإنه لأمر ممكن تماماً أن تفصل بين الفجوتين في الفضاء الأصلي مسافة شاسعة، ومع هذا تصيران متجاورتين عبر «العُنُق» الذي يصل بينهما. وهذه الإمكانية جعلت النفق وسيلةً مفضَّلة لدى كتاب الخيال العلمي للتنقل من مكان إلى آخر بسرعة تفوق سرعة الضوء، إذ يكفي الواحد منهم أن يخرق فجوتين في الفضاء ثم يصل بينهما ويحبو خلال العنق! وهذه الخطة لن تنجح للأسف ولو أمكننا تصميم ثاقب لهذا الغرض (وهو أمر بعيد الاحتمال). ذلك أنه عندما تخضع هندسة الزمكان لمعادلات أينشتين فإن النفق يصبح جسماً ديناميكياً. وهكذا تكون النتيجة أن الفجوتين اللتين يصل بينهما تكونان بالضرورة فجوتين سوداوين، وكل ما يدخل فيهما لن يستطيع الخروج مرة ثانية. وحقيقة ما يحدث هو أن العُنُق يَنْقبضُ فينسحِقُ كلُّ القدر قبل أن يتمكن من الوصول إلى الناحية الأخرى.

أما الرافد الثالث للجاذبية الكمومية، وهو الميكانيكا الكمومية، فقد تم اكتشافه عام 1925 من قِبَل (و. هايزنبرك) Wrener Heisenberg و(إ. شردلكر) Erwin Schrödinger إلاَّ أن صياغتهما الأولية لم تأخذ بعين الاعتبار نظرية النسبية الخاصة، ومع هذا فقد كان نجاح هذه النظرية فورياً وباهراً، ويعود السبب في ذلك إلى تراكم أعداد ضخمة من النتائج العلمية التي كانت تنتظر من يفسِّرها. وقد لعبت الظواهر الكمومية دوراً رئيسياً في هذه النتائج. أما التأثيرات النسبية فقد كان دورها ثانوياً للغاية. ومع هذا فقد كان معروفاً أن سرعة الإلكترونات في بعض الذرات تقارب في قدْرها سرعة الضوء ولهذا فإن البحث عن نظرية كمومية نسبيةٍ لم يتخلَّف كثيراً.

فبحلول أواسط الثلاثينيات كان الفيزيائيون قد تأكدوا أن رفد النظرية الكمومية بنظرية النسبية الخاصة سيقود إلى استنباط حقائق جديدة كلياً، وأهمها الحقيقتان الآتيتان: الحقيقة الأولى: هي أن كل جسيم لابد وأن يكون منتسباً إلى نوع من أنواع الحقول وأن كل

حقل لابد وأن ينتسب إلى فئة من الجُسيمات المتطابقة. وبهذا فلم يعُد من الجائز اعتبار الحقل الإلكترمغنطيسي وحقل الجاذبية على أنهما الحقلين الوحيدين الأساسيين.

الحقيقية الثانية: هي أن الجسيمات إنما تأتي في صنفين وذلك تبعاً لقدر عزم دورانها السبيني[3] المكمّى (المُكنْتَم). فالجسيمات التي تحمل سبينا يساوي h/2، 3h/2 أو مثيلاتهما، تكون خاضعةً لقاعدة التفرُّد[4] (التي تنص على استحالة أن يشغل جسيمان الحالة الكمومية نفسها). أما الجُسيمات التي تحمل سَبيناً يساوي 0، h، 2h أو مثيلاتها، فليس هنالك ما يحول دون أن يشغل أي عدد منها الحالة الكمومية نفسها.

وفي نصف العقد المنصرم تم التحقق مراراً وتكراراً من صحة هذه النتائج الأساسية، التي تنتج عن توحيد نظرية النسبية الخاصة مع الميكانيكا الكمومية. وناتج الجمع بين هاتين النظريتين هو نظرية أشمل من مجموع مركباتها. وتتجلى هذه النتيجة بوضوح أكثر إذا ما أخذنا بعين الاعتبار نظرية الجاذبية أيضاً.

وتبعاً للفيزياء الكلاسيكية فإن الفراغ هو الفضاء المنبسط والخالي. فهذا الفراغ الكلاسيكي إنما هو قَفْر من أية معالم. أما في الفيزياء الكمومية فإن اسم الفراغ يُطلق على كائن يفوقه تعقيداً بدرجة كبيرة، ويتمتع/بتركيبه بوفرة في الخواص. أما تركيبه هذا فيعود إلى وجود حقول طليقة مندثرة فيه، ونقصد بها الحقول التي تكون بعيدة عن مصادرها.

ويمكن تمثيل الحقل الكهرمغنطيسي الطليق من الناحية الرياضية بمجموعة غير محدودة من النواسات المتناغمة[5] البسيطة. أما النواس فيُمكن تمثيله بواسطة زُنْبُرك يكون أحد طرفيه ثابتاً، والطرف الآخر يتحرك بحركة كتلة ثُبّت فيه. وفي الفراغ يكون كل نواس في «حالته الدركية» Ground State وهي الحالة التي تبلغ بها طاقته قيمتها الدُّنيا. وعندما يكون هناك نواس كلاسيكي (غير كمومي) في حالته الدركية فإنه يكون ثابتاً في نقطة معينة. وهذا الوضع لا ينطبق على النواس الكمومي. لأنه إذا كان هناك نواس كمومي ثابت في نقطة معينة، فإن هذا يعني أن موضعه قد تحدَّد بدقَّة غير محدودة القدر. وفي هذه الحالة فإن مبدأ الارتياب[6] يقتضي أن يكون قدر كل من عزمه وطاقته غير محدود: وهذا أمر مستحيل. فعندما يكون هناك نوّاس كمومي في حالته الدركية فإنه لا يمكن لموضعه أو لعزمه أن يكون محدداً بكل تأكيد. بل إن كليهما عرضة للتَّرجُّحات العشوائية. وما يترجَّحُ في الفضاء الكمومي هو الحقل الكهرمغنطيسي (وسائر ما عداه من الحقول).





نواح متباعدة من الكون قد يكون بالإمكان ربطها من الناحية المبدئية بنفق نخر. وهذا يوحي بأنه قد يكون بالإمكان الاتصال بينهما بإشارات تفوق سرعتها سرعة الضوء. غير أنه لن يكون بإمكان هذه الخطة أن تنجح. ففي الرسم العلوي إلى اليسار تكون المسافة بين الفتحتين عبر العالم الخارجي، مساوية تقريباً للمسافة عبر «عنق» النفق. أما في الرسم السفلي إلى اليسار فإن المسافة الخارجية تفوق بكثير المسافة عبر العنق. وفي الرسمين السفليين يبدو الفضاء الممثل بالمستوى متقوّساً؛ لأننا ننظر إليه انطلاقاً من فضاء يزيد عليه بعدد أبعاده ولكنه سيبدو منبسطاً بصورة تقريبية لمشاهد يعيش عليه. ولكن سواء شكل عنق النفق اختصاراً للمسافة أم لا، فليس بالإمكان المرور عبره. وسبب ذلك أن النفق النَّخر يصل دوماً بين ثقبين سوداوين. وكما نرى إلى اليمين فإن العنق ينقبض، بحيث تكون النتيجة أن أي شيء يدخله سينسحق إلى كثافة غير محدودة قبل أن يتمكن من الوصول إلى الجهة الأخرى.

ومع أن ترجُحات الحقل في الفراغ الكمومي تكون عشوائية، إلاَّ أنها تكون من نوع خاص. فهي تخضع لمبدأ النسبية، بمعنى أنها «تبدو» على الهيئة نفسها لكل مشاهد غير متسارع مهما كانت سرعته. وإنه لمن الممكن أن نبيِّن أن هذه الخاصيَّة تعني أن متوسط قدر الحقل يكون صفراً وأن قدر الترجحات يزداد كلما تضاءل طول موجات الحقل. وتكون نتيجة كل ذلك أن المشاهد لن يتمكن من استغلال الترجحات بغية تحديد سرعته.

إلاَّ أنه بالإمكان استغلال الترجحات بغية تحديد التسارع. وهذا ما بيَّنه عام 1976 (و.ك. أونرو) William G. Unruh الأستاذ في جامعة «بريتيش كولومبيا». فقد بيَّن أن كاشفاً افتراضياً للجسيمات ينطلق بتسارع ثابت يتفاعل مع الترجحات كما لو كان ساكناً ضمن غاز من الجسيمات (إذن ليس في فراغ) ذي حرارة تتناسب درجتها مع التسارع، ولو كان الكاشف غير متسارع لما تفاعل مع الترجحات إطلاقاً.

وقد قادت فكرة إمكانية ربط الحرارة والتسارع بهذه الطريقة إلى أن نعيد النظر بمعنى «الفراغ»، وإلى أن نتبيَّن أن هناك عدة أنواع من الفراغات، وسنمثل هذا الأمر بأن نعطي تصوراً لواحد من أبسط الفراغات غير الاعتيادية. أما وسيلتنا لذلك فستكون تجربة ذهنيّة كان «آينشتين» أول من اقترحها، ولكننا سنعيد إجراءها ضمن سياق كمومي. تتخيل مصعداً مغلقاً طليقاً في الفضاء ولنفترض وجود «كائن ما» يبدأ بدفع المصعد باتجاه السقف إلى أن يجعله يسير بتسارع ثابت. وسوف نفترض أن جدران المصعد

---

(3) quantized spin angular momentum

سَبِيني نسبة إلى «سَبِين» Spin ويقال أيضاً «فتل».

(4) the exclusion Principle ويقال أيضاً «مبدأ الاستبعاد».

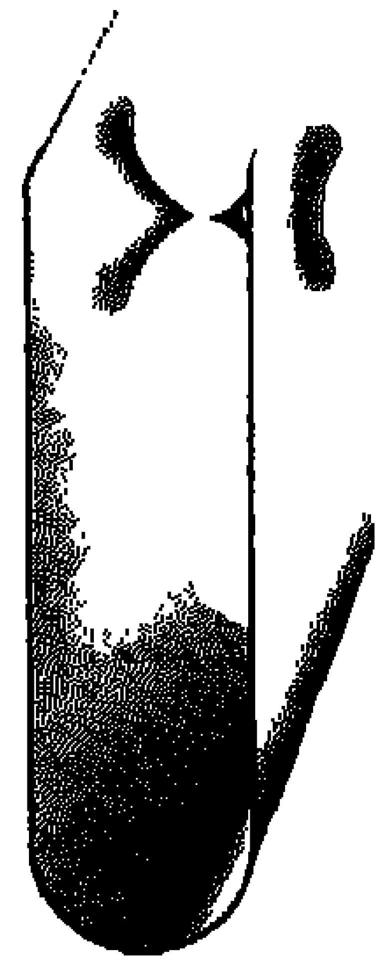
(5) Hermonic Oscillators

(6) The Uncertainty Principle

موصلة تامة للكهرباء. وأن الإشعاع الكهرمغنطيسي لا ينفذ منها، وأن المصعد نفسه خال تماماً، بحيث لا يوجد في داخله أي جسيمات. ولقد استغل أينشتين هذه التجربة الوهمية وسيلة لتوضيح التعادل بين الجاذبية والتسارع. إلاّ أن إعادة مناقشتها سوف ترينا أنه يجب أن نتوقع عدة ظواهر ذات طبيعة كمومية بحتة. ففي اللحظة التي يبدأ فيها التسارع، تنبعث من أرض الغرفة موجة كهرمغنطيسية تأخذ في الانتشار إلى أن تصل السقف، ثم ترتد منعكسة وهكذا دواليك. (ولن نتطرق هنا إلى سبب انبعاث هذه الموجة، لأن ذلك يقتضي معالجة رياضية مفصّلة لموصل كهربائي متسارع. إلاّ أننا نشير إلى أن هذا الوضع شبيه بالوضع الذي كانت ستنبعث فيه موجة صوتية انضغاطية فيما لو كان المصعد مليئاً بالهواء). ولو افترضنا بعض التبديد المؤقت لطاقة الموجة في الجدران فإنها ستتحول إلى فوتونات ذات طاقة بطيف حراري. وبتعبير آخر فإن الموجة الكهرمغنطيسية ستتحول إلى إشعاع جسم أسود يتميز بحرارة معينة.

يمتلئُ المصعد الآن بغاز غير مضغوط من الفوتونات، وبأخذنا لبعض الطاقة من مصدر خارج المصعد يصبح بإمكاننا تشغيل جهاز تبريد، ونجعل مَصرِفَ الحرارة فيه في الخارج فنتمكن بواسطته من التخلص من الفوتونات التي في الداخل. وفي النهاية وبعد أن يتسنى لنا ضخ جميع الفوتونات إلى الخارج يتكوَّن لنا في داخل المصعد فراغ جديد يختلف بصورة دقيقة عن الفراغ الذي في الخارج. أما أوجه الخلاف فهي الآتية: أولاً، إذا أخذنا كاشف «أونرو» وجعلنا له نفس تسارع المصعد فهو سيتفاعل حرارياً مع ترجحات الحقل فيما لو وضعناه في الفراغ العادي خارج المصعد. ولكنه لن يسجّل أي تفاعلات في داخله. ثانياً، هذان الفراغان يختلفان فيما يحتويانه من الطاقة.





إن التوبولوجية المترجّحة التي تشكل سمةً من سمات الزمكان في بعض المحاولات لصياغة نظرية للجاذبية الكمومية، تثير صعوبات رئيسية في مفاهيمنا. ويمثل الشكل وضعين لنفق نخر وقد انقبض لتوّه مُخلفاً قرنين في أثره. وإذا كان هذا الحدث ممكناً وجب أن تكون العملية العكسية ممكنة أيضاً، أي أنه يجب أن يكون بإمكان القرنين أن يتصلا ليكوّنا نفقاً جديداً. وتبدو هذه العملية العكسية ممكنة عندما يكون القرنان متقاربين غير متباعدين. إلاّ أن مفهومي «القُرب» و«البُعد» يعتمدان على زرع السطح في فضاء يزيد عليه بعدد أبعاده. أما المشاهد الذي يعيش على السطح فلن يتمكن من التمييز بين هذين الوضعين.

أما تحديد طاقة الفراغ، فهو أمر يقتضي حل إشكالات حساسة في نظرية الحقول الكمومية. فقد ذكرنا سابقاً أن الحقل الطليق هو بمثابة مجموعة من «النواسات المتناغمة» Harmonic Oscillators. وبسبب ترجحات الحالة الدركية لهذه النواسات فإن الحقل في الفراغ يكتسب «طاقةً فضلَةً» Residual Energy تسمى «طاقة نقطة الصفر» The Zero-Point Energy. ولما كان عدد النواسات الحقلية في وحدة الحجم لا نهائياً، فإنه يبدو وكأن كثافة الطاقة في الفراغ ستكون لا نهائية أيضاً.

إلاّ أن كثافةً لا نهائية للطاقة ستكون أمراً مربكاً حقاً، ولذلك فقد أدخل العلماء النظريون بعض الإجراءات التقنية لاستبعادها. وتشكل هذه الإجراءات جزءاً من برنامج عامٍّ يسمى نظرية «إعادة التنظيم» Renormalization، وهدفه معالجة ما يطرأ على نظرية الحقول الكمومية من أصناف الأقدار اللانهائية. وأي إجراء نتبناه يجب أن يكون شاملاً بمعنى أن لا يكون مفصّلاً لوضع فيزيائي معين، بل يجب أن ينطبق على جميع الأوضاع بالتكافؤ، كما أنه يجب أن يقود إلى قيمة متلاشية لكثافة الطاقة في حالة الفراغ الاعتيادي. هذا الشرط الأخير ضروري للانسجام مع نظرية أينشتين؛ وذلك لأن الفراغ الاعتيادي هو المعادل الكمومي للزمكان المنبسط الخالي. فإذا احتوى على أي قدر من الطاقة فإنه لن يكون منبسطاً.

وبصورة دائمة فإن المناهج المختلفة المتبعة في نظرية إعادة التنظيم تعطي النتائج نفسها عندما تعالج المشكلة نفسها. وهذا يدعونا إلى الثقة بصحتها. وعندما نطبقها على الفراغ في داخل المصعد وفي خارجه فإنها تعطينا صفراً للطاقة في الخارج في حين تعطينا قيمة سالبة للطاقة في الداخل. وهذه القيمة السالبة لطاقة الفراغ هي قطعاً مفاجئة: فماذا يمكن أن يكون أقل من العدم؟ إلاّ أن قليلاً من التفكير سيُبين لنا أن هذه القيمة السالبة هي أمر معقول، إذ علينا أن نضيف فوتونات حرارية إلى داخل المصعد، إذا نحن أردنا لكاشف أنرو أن يكون له الفعل نفسه داخل المصعد كما في خارجه. وعندما نُدخل هذه الفوتونات فإن طاقتها تُضاف إلى طاقة الفراغ في الداخل، وهكذا يصل المجموع إلى الصفر، متساوياً بذلك مع قيمة طاقة الفراغ في الخارج.

ولكن علينا أن نؤكد أنه سيكون من الصعب مشاهدة ظواهر غريبة كهذه بصورة عملية.. ففي حالات التسارع التي نعهدها في حياتنا اليومية وحتى في المكائن فائقة السرعة، فإن القيمة السالبة للطاقة تبقى ضئيلة لدرجة لا يمكن معها قياسها. ولكن هناك حالة واحدة تم فيها قياس قيمة سالبة لطاقة الفراغ، وإن يكن بطريقة غير مباشرة. وقد تم ذلك في الظاهرة التي تنبأ بوجودها عام 1948 (هـ. ب. ك. كاسيمير) H. B. G. Coasimir عندما كان يعمل في مختبرات أبحاث شركة «فيليبس» في هولندا. ففي ظاهرة «كاسيمير» يؤخذ قرصان معدنيان متوازيان نظيفان وغيـر

مشحونين ومسطحان بدرجة ميكروسكوبية، ويوضعان متقاربين في الفراغ. ولدى قياس القوة عليهما يتبين أنهما يتجاذبان بقوة ضعيفة يمكن ردها إلى كثافة الطاقة السلبية في الفراغ بينهما.

أما عندما يتقوس الزمكان فإن الفراغ يصبح أكثر تعقيداً. فالتقوس يؤثر في التوزع الفضائي لترجحات الحقل الكمومية، وكما كان الحال بالنسبة للتسارع فإنه قادر على جعل طاقة الفراغ تختلف عن الصفر. وبما أنه يمكن للتقوس أن يختلف من مكان إلى آخر، فسيكون ممكناً لطاقة الفراغ أن تختلف من مكان إلى آخر فتكون موجبة في بعض الأماكن وسالبة في أماكن أخرى.

وفي أي نظرية سويّة لابد وأن تكون الطاقة محفوظة. ولنفترض ــ لغايتنا هنا ــ أن تزايد التقوس يؤدي إلى تزايد في طاقة الفراغ الكمومية. وبما أن هذه الطاقة يجب أن تأتي من مصدر ما، فإن مجرد وجود ترجحات كنتمية للحقل يستتبع كون الطاقة ضرورية لتقويس الزمكان. ومن هنا نستنتج أن الزمكان يقاوم التقوس تماماً كما هي الحال في نظرية أينشتين.

وفي عام 1967 أشار عالم الفيزياء الروسي (أ. ساخاروف) A. Sakhrov إلى احتمال كون الجاذبية ظاهرة كمومية بحتة، مصدرها طاقة الفراغ، وإلى إمكانية حساب ثابت نيوتن G من مبادئ أولية، أي حساب تصلب الزمكان. ويواجه هذا الاقتراح صعوبات عديدة، أولها، أنه يستلزم أن نستبدل بالجاذبية كحقل أولي، حقلاً معيارياً شامل التوحيد، تبعاً لمقتضيات الجسيمات الأولية المعروفة. وفي هذه الحال علينا أن نُدخل كتلة أساسية في النظرية، إذا ما أردنا الحفاظ على مقاس مطلق للوحدات. فتكون نتيجة جهدنا إحلال ثابت أساسي مكان ثابت أساسي آخر.

ثانيها ــ وقد يكون هو الأهم ــ أنه ينتج عن هذه الحسابات أن طاقة الفراغ تعتمد على التقوس وهذا يؤدي بدوره إلى نظرية للجاذبية أكثر تعقيداً من نظرية آينشتين. فتبعاً لعدد ونوع الحقول الأولية التي نختار، وتبعاً لطريقة إعادة التنظيم التي نتبع، فإنه يمكن لطاقة الفراغ أن تتناقص بدلاً من أن تتزايد بتزايُد التقوُّس. إن علاقة معكوسة كهذه ستعني أن الزمكان المنبسط لن يكون مستقراً، وسيتجه نحو التَّجعد مثلما تتجعد حبة خوخ مجففة. ولهذا فإننا سنعتبر هنا أن حقل الجاذبية هو حقل أولي.

يُعرَّف الفراغ الحقيقي على أنه حالة استقرار حراري على درجة حرارة الصفر المطلق. إن فراغاً كهذا لا يمكن أن يوجد في حالة الجاذبية الكمومية إلاَّ إذا كان التقوس لا يعتمد على الزمن أما إذا اعتمد على الزمن فإنه سيكون من الممكن للجسيمات أن تظهر في الفراغ بصورة تلقائية (مما يجعله يتوقف عن أن يكون فراغاً بالطبع).

أما كيفية تولُّد الجسيمات فبالإمكان شرحها مرة أخرى بوساطة النواسات المتناغمة. إن تغير التقوس يستتبع تغير الخواص الفيزيائية لنواسات الحقل. ولنفترض أن نواساً عادياً يبدأ من الحالة الدركية، أي خاضع لنَوْس نقطة الصفر فإذا حصل تغير في إحدى خواصه ككتلته مثلاً أو صلابة زنبركه فإن نواس نقطة الصفر سيتعدل انسجاماً مع هذا التغير. وبعد هذا التعدُّل فإن احتمال انتقال النواس من حالته الدركية إلى حالة مثارة سيصبح فوق الصفر. وهذه الظاهرة شبيهة بتلك التي يتزايد فيها اهتزاز سلك البيانو عندما نزيد التوتر الذي يشده والتي تدعى ظاهرة (الإثارة الوسيطية) Parametric Excitation وفي حالة الحقل الكمومي. فإن نظير الإثارة الوسيطية يتمثل بعملية تولُّد الجسيمات.

إن الجسيمات التي يولدها التقوس المتغير مع الزمن تظهر بصورة عشوائية، إذ ليس بمقدورنا أن نستنبط مسبقاً أين ومتى سيتولد جسيم معين، إلا أنه بإمكاننا حساب التوزع الإحصائي لطاقة وعزم الجسيمات. فتولد الجسيمات يكون على أعلى قدره عندما يكون التقوس على أعلى قدره أيضاً، ويتغير بأقصى سرعته. ومن

الفراغ الكمومي كما تخيّله عام 1957 (ج.أ. ويلر) تتزايد فيه الفوضى مع تضاؤل حجم الناحية التي نتفحصها من الفضاء. فعلى مقاس نواة الذرة (الشكل العلوي) يبدو الفضاء صقيلاً جداً. وعلى مقاس 10^{-30} سنتيمتراً (الشكل الأوسط) يبدأ ظهور بعض الوعورة في الهندسة. وأما على مقاس طول «بلانك»، أي أصغر بألف مرة (الشكل السفلي)، فإن تقوس الفضاء وتوبولوجيته يتغيران بصورة عنيفة ومستمرة.

المحتمل أنه قد كان عالياً جداً خلال الانفجار الأولي، وأن يكون قد لعب دوراً رئيسياً في التأثير على حركة الكون في لحظاته الأولى. وليس من المستبعد أن تكون الجسيمات المتولدة بهذه الطريقة هي مصدر المادة الموجودة في الكون كلها.

وأولى المحاولات لحساب تولد الجسيمات في الانفجار الأولي قام بها قبل عقد من الزمن وبصورة مستقلة واحداً تلو الآخر، كل من الأكاديمي الروسي (إ.ب. زلدوفيتش) و(ل.إ. باركر) Leonard E. Parker الأستاذ في جامعة «وسكنسن» في بلدة «ملوكي» وقد تبعهم بعد ذلك كثيرون على هذه الطريق. ولكن على الرغم من أن العديد من نتائج هذه الحسابات هو في الاتجاه الصحيح، إلاَّ أن أياً منها ليس ذا طبيعة نهائية. وإضافة إلى ذلك فهناك سؤال أساسي مازال يدور حول هذه الجهود: ماذا يجب أن نختار لحالة البداية الكمومية لحظة وقوع الانفجار الأولي؟ وفي الإجابة عن هذا السؤال يكون الفيزيائي قد قرر مصير الكون. وليس هناك من بين الإجابات المقترحة ما يبدو مقنعاً بصورة تسمح بالأخذ به دون غيره.

ثمة حدث آخر يحدث في الكون، ويستوجب أن يتغير التقوس بسرعة أثناء حدوثه، وهو انهيار نجمة لتُكوِّن ثقباً أسود Black Hole، وفي هذه الحال فقد أتت الحسابات الميكانيكية الكمومية بمفاجأة حقيقية مستقلة في جوهرها عن شروط البداية. فقد بين (س.و. هوكينك) Stephen W. Hawking من جامعة كامبردج عام 1974 أن تغير التقوس على مقربة من ثقب أسود منهار يولد فيضاً من الجسيمات. ويستمر هذا الفيض لوقت طويل بعد أن يخبو نشاط الثقب الأسود الهندسي، وما يمكنه من الاستمرار هو تباطؤ وتيرة الزمن بتأثير حقل الجاذبية الهائل بالقرب من «الأفق» المتشكل من سطح الثقب الأسود: وهو الأفق الذي تتوقف خلفه جميع أوجه النشاط بالنسبة لمشاهد خارجي! فالجسيمات التي تتولد بالقرب من الأفق تتعرض للتأخر في رحلتها إلى الخارج.

وعلى الرغم من أن تأخر الجسيمات بالصدور يُعني تحشد أعداد هائلة منها بالقرب من الأفق، «كل ينتظر دوره» كي يخرج، فإن الكثافة الإجمالية للطاقة في هذه المنطقة هي في الواقع سالبة وصغيرة إلى حد ما. فالطاقة الموجبة التي تحملها الجسيمات تعادلها طاقة فراغ سالبة هائلة قد تكون هناك لو لم تكن الجسيمات موجودة (مثلاً، إذا كان الثقب الأسود موجوداً دائماً دون أن يكون على الإطلاق انهيار جانبي).

وبالإمكان أن نستنتج من الحسابات النظرية أنه لا يوجد أي ترابط إحصائي بين الجسيمات المُنبثَّة، وأن طيف طاقتها يكون من النوع الحراري. ولعل أهم خاصية لهذا الإشعاع هي كون طبيعته من نفس نوع طبيعة إشعاع الجسم الأسود. فبواسطتها نتمكن من أن نُعيِّن للثقب الأسود ميزتين أساسيتين هما: الحرارة و(الأنتروبية) Entropy. وتُحدِّد الأنتروبية درجة انعدام الترتيب الترموديناميكي في الثقب الأسود. وحسب النتيجة النظرية فإن قدرها يتناسب طردياً مع مساحة سطح الأفق. ففي ثقب أسود بكتلة نجمية Stellar، تبلغ (الأنتروبية) مستويات هائلة، فهي تفوق قدر أنتروبية النجمة التي انهارت لتكوِّن الثقب الأسود بمضروب قدره 10^{19}. ومن ناحية أخرى فإن الحرارة تتناسب عكسياً مع كتلة الثقب الأسود. فإذا كانت الكتلة معادلة لكتل النجوم فإنها تكون أقل من حرارة النجمة الأم بمضروب قدره 10^{-11}.

ولما كانت كمية الإشعاع الذي يبثه جسم ما، تعتمد على حرارة ذلك الجسم فإن إشعاع «هوكينك» من ثقب أسود فلكي أمر ضئيل كلياً. وهو يصبح مهماً فقط في حالة الثقوب السوداء الصغرى، «Mini» Black Holes، والتي لا تزيد كثافتها عن 10^{15} غراماً. أمّا الإمكانية الوحيدة لتكوين هذه الثقوب السوداء الصُغرى فهي عبر الانضغاط أثناء الانفجار الأولي، ومن المحتمل أن تكون قد تولدت بوفرة في ذلك الحين، وعندئذ فإنها تكون قد أسهمت بدرجة ملحوظة في أنتروبية الكون.

ولكن من أين تأتي طاقة الجسيمات التي يولدها تقوس متغير مع الزمن؟ الجواب أنها تأتي من الزمكان نفسه. ومنه نستنتج أن الجسيمات تقوم بردة فعل على الزمكان. وقد جرت محاولات لحساب (ردة الفعل) Back Reaction في حالة الانفجار الأولي بغية تحديد تأثيرها الديناميكي على الكون في وقت مبكِّر. وقد كان الهدف التحقق ما إذا كان بإمكان ردة الفعل هذه أن تحد كثافة البداية اللانهائية للمادة والتي تستوجبها نظرية آينشتين الكلاسيكية. وهذه الكثافة اللانهائية تشكل حاجزاً أمام أي تقدم في البحث. أما إذا تسنَّى لنا أن نستبدل بها مجرد كثافة هائلة الحجم فسيقول قائل: ولكن أنَّى للكون أن يكون موجوداً قبل الانفجار الأولي؟.

وفي الستينيات بيَّن (ر. بنروز) الأستاذ في جامعة أكسفورد و(هوكينك) أن نظرية (آينشتين) الكلاسيكية غير تامة. فهي تقود إلى حدوث كثافات وتقوُّسات لا نهائية سواء في الماضي أو في المستقبل انطلاقاً من عدة خيارات معقولة لأوضاع فيزيائية في الحاضر. وإذا استنبطت نظرية ما قدراً لا نهائياً لكمية مقيسة، فإنها تتوقف بالضرورة عند هذه النقطة ولا يمكنها تخطيها. إلاَّ أن الفيزيائيين يؤمنون بأننا سنتوصل إلى فهم الطبيعة يوماً ما، لذا — وأمام وضع كهذا — فإن المعالجة الصحيحة لنظرية كهذه تكون بتوسيعها لتشمل فئات أكثر من الظواهر الطبيعية. والنظرة المحافظة إلى هذا الأمر في الوقت الحاضر هي أن العلاج الوحيد المعقول والمتوفر لعدم تمام نظرية آينشتين الكلاسيكية يمكن في أخذ الظواهر الكمومية بعين الاعتبار.

وتُجرى حسابات ردة الفعل على الانفجار الأولي بطريقة المحاكاة العددية على الحاسوب. ولكن نتائجها ما تزال غامضة حتى الآن. وإحدى العقبات التي تواجه هذه الحسابات هي كيفية اختيار عدد معقول يُمثل كثافة طاقة كل من الجسيمات المتولدة والفضاء الذي تنتشر فيه هذه الجسيمات بغية استعماله في مدخلات الحاسوب.

وتلعب ردة الفعل دوراً ذا أهمية خاصة في حالة الثقب الأسود. ذلك أن إشعاع «هوكينك» يحمل معه أنتروبية وطاقةً من الثقب الأسود. وبالنتيجة فإن كتلة الثقب تبدأ بالتناقص. وتكون وتيرة التناقص بطيئة في البدء ولكنها تأخذ بالتسارع مع ارتفاع الحرارة وأخيراً تصل وتيرة التناقص حداً تُخفق عنده التقريبات التي تقوم عليها حسابات «هوكينك». وليس هناك من يعلم ماذا يمكن أن يحصل بعد ذلك. أما «هوكينك» فإنه يؤمن بأن تقريباته تبقى صحيحة بصورة إجمالية وأن الثقب الأسود ينهي حياته بومضة باهرة تاركاً خلفه لبرهة وجيزة (نقطة فريدة عارية) Nabed Singnlarity في التركيب السببي للزمكان.

إلاّ أن أي نقطة فريدة سواء أكانت عارية أم لا، فإنها تمثل فشلاً للنظرية. وإذا كان «هوكينك» على صواب، فستكون النتيجة عدم تمام النظرية الكمومية إضافة إلى نظرية «آينشتين». أما سبب ذلك فهو الآتي: لكل جسيم يتولد خارج السطح الأفقي هناك جسيم آخر يتولد داخله. وهناك ترابط بين هذين الجسيمين، بمعنى أنه يمكن لمشاهد أن يلاحظ «ظواهر تداخل احتمالي» بينهما إذا استطاع الاتصال بكلا الجسمين في آن واحد. ويفترض «هوكينك» أن الجسيمات في الداخل تنسحق إلى كثافة لا نهائية وتفنى. وفي اللحظة التي تفنى فيها الجسيمات ينهار التفسير الاحتمالي المعهود للميكانيكا الكمومية. ذلك أن الاحتمال نفسه يضيع في الانسحاق اللانهائي هذا.

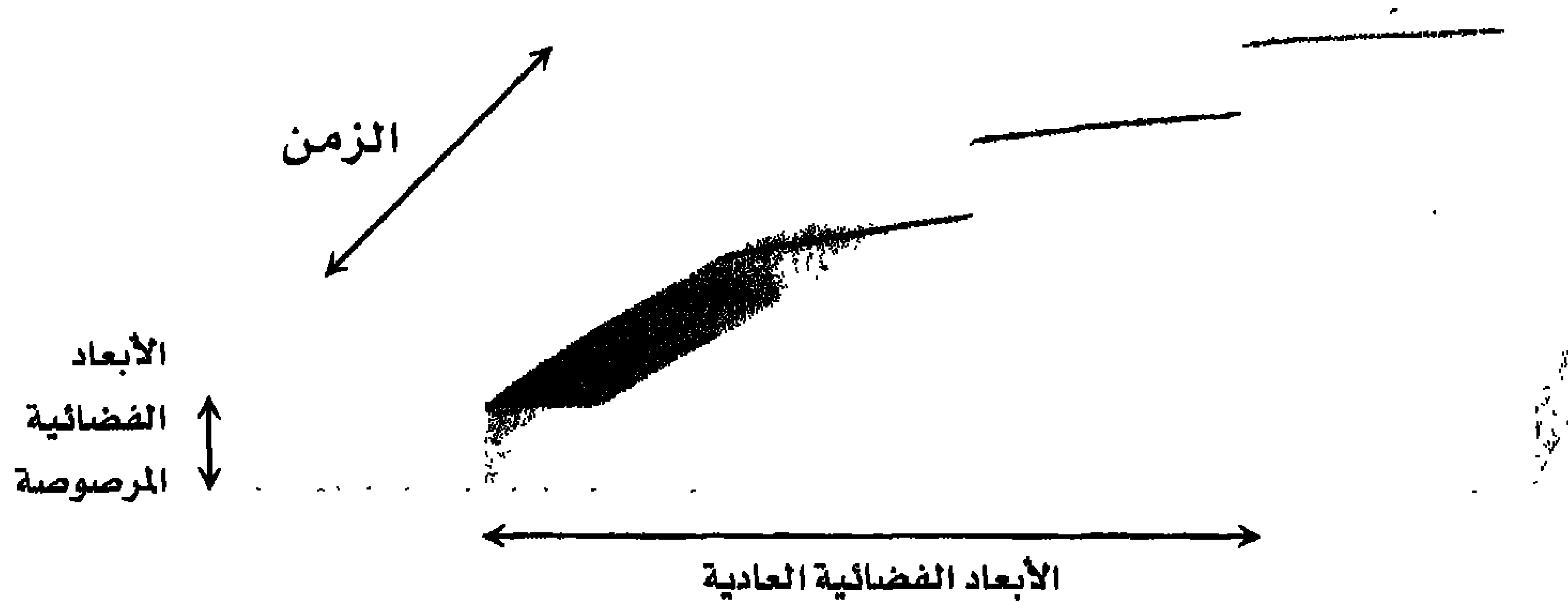
إلاّ أنه بإمكاننا أن ننطلق من افتراض مغاير ولكن له الأهلية نفسها كالذي سبق. وهو أن نعتبر أن هيكلية نظرية الحقول الكمومية نفسها والتي نقيمها حول نظرية آينشتين تحول دون ضياع الاحتمالات والمعلومات أثناء الانهيار. وإنه لمن المحتمل أن تتعاظم ردة الفعل لدرجة تحول دون أن يصبح الانسحاق لا متناهياً. وحتى الأفق، الذي هو بنية ذهنية وليست مادية، قد لا يكون له وجود البتة كحاجز لا يمكن عبوره إلاّ في اتجاه واحد. وكذلك الكتلة التي انهارت لتكوّن الثقب الأسود، فقد يمكننا في النهاية أن نقدم كشف حساب لها عبر الجسيمات المتولدة. أمّا أنه ستكون هناك ومضة نهائية من إشعاع «هوكينك» فهذا مما لا يشك به أحد، إلاّ أن الضغط الهائل الذي تتعرض له الجسيمات النووية قد يحولها إلى فوتونات وإلى غيرها من الجسيمات عديمة كتل السكون، والتي سيكون بمقدورها في النهاية أن تفلت حاملة معها ما تبقى من طاقة ضئيلة، إضافة إلى جميع الترابطات الكمومية. ولن يكون مطلوباً من هذه الجسيمات النهائية أن تحمل معها أي جزء من إنتروبية الثقب الأسود الأصلية، إذ أن هذه كان قد حملها معه إشعاع هوكينك.

والآن نصل إلى الجزء العميق والصعب من الجاذبية الكمومية. فعندما تكون هناك ردة فعل من قبل ظاهرة كمومية مثل تولد الجسيمات أو طاقة الفراغ، على تقوس الزمكان، فإن التقوس نفسه يصبح كائناً كمومياً. فإذا أردنا لبياننا النظري أن يكون متماسكاً وجب أن (نُكَمي) Quantize حقل الجاذبية نفسه. وعندما تكون أطوال موجات الحقل الجاذبي المكمى كبيرة بالنسبة لطول بلانك فإن الترجحات الكمومية التي سيتعرض لها ستكون صغيرة. وبالإمكان معالجتها بصورة صحيحة باعتبارها تعديلاً طفيفاً على خلفية كلاسيكية. ويمكن معالجة هذا التعديل كما لو كان حقلاً مستقلاً. وهكذا فهو سيضيف حصته إلى طاقة الفراغ وإلى الجسيمات المتولدة.

أما عندما تكون أطوال موجات الحقل الجاذبي وطاقتها بمستوى «بلانك»، فإن الوضع يصبح أكثر تعقيداً وذلك بصورة أساسية. فالجسيمات التابعة لحقل جاذبية ضعيف تسمى «غرافتونات» Gravitons وهي عديمة كتلة السكون وتحمل عزماً سبينياً قدره 2h. وليس هناك أي احتمال في أن نتمكن من مشاهدة غرافتون بمفرده. فالمادة العادية، حتى ولو كانت بحجم المجرة، تكون شفافة تماماً بالنسبة لعبور الغرافتونات. وكي تتمكن الغرافتونات من التفاعل مع المادة بدرجة ملحوظة لابد أن تصل طاقتها إلى مستوى طاقة «بلانك». ولكن عندما تكون الغرافتونات على هذا القدر المرتفع من الطاقة تصبح قادرة على أن تبعث تقوساً بلانكياً في (الخلفية الهندسية) Background Geometry، وعندها لن يعود بالإمكان اعتبار الحقل الذي تنتمي إليه ضعيفاً ويصبح مفهوم «الجسيم» نفسه غير واضح المعالم.



إن مفهوم استقرارية عدد أبعاد الفضاء يصبح عرضة للتساؤل في ضوء احتمال كون الزمكان ذا توبولوجية معقدة. ونرى في الشكل سطحاً ثنائي الأبعاد. غير أن ترابطاته التوبولوجية تضفي عليه هيئة جسم ثلاثي الأبعاد فالفضاء يبدو لنا ثلاثي الأبعاد على الصعيد الماكروسكوبي. إلا أنه من المحتمل أن يكون عدد أبعاده أقل في الواقع ولكنه يتميز بتوبولوجية متداخلة.



يمكن وجود أبعاد فضائية إضافية. فوق الثلاثة المعهودة، إذ كان لها (شكل مرصوص) Compact Form يمكن لبعد رابع مثلاً أن يلتف على شكل أسطوانة بمحيط قدره 10^{-23} سنتيمتراً على وجه التقريب. ونرى على الشكل البعد الوهمي وقد «مددناه» ومثلناه بالمحور الشاقولي في مخطط زمكاني. وبذلك تأخذ إحدى مركبات مسار الجسيم شكلاً دورياً، بحيث أنه متى وصل الجسيم إلى نهاية البعد المرصوص عاد إلى نقطة البداية.

ويكون المسار الذي نشاهده في الطبيعة إسقاطاً للمسار الحقيقي على الأبعاد الماكروسكوبية للزمكان. أما إذا كان مسار الجسيم خطاً جيوديزياً Geodesic، فإنه سيبدو كجسيم مشحون كهربائياً سائر في حقل كهربائي. وقد وضع هذه النظرية كل من (ت. كلوزا) و(أ. كلاين) في العشرينيات وبيّنا كيف أنه يمكن لها أن تعطي تفسيراً للجاذبية وللكهرمغنطيسية وقد تزايد الاهتمام بهذا النوع من النظريات في الآونة الأخيرة.

وعلى نطاق الموجات الطويلة فإن الطاقة التي تحملها الغرافتونات تسبب عَوَجاً في الخلفية الهندسية. وعلى نطاق الموجات القصيرة فإنها تسبب عوجاً في الموجات الناتجة عن الغرافتون نفسه، وهذه الظاهرة هي نتيجة الطبيعة غير الأحادية لنظرية آينشتين: أي أننا عندما ندمج حقلين جاذبيين، فإن الحقل الناتج لا يساوي مجموع مركباته. وجميع نظريات الحقول غير التافهة هي نظريات غير أحادية. وفي بعض هذه النظريات فإنه بالإمكان معالجة اللاّ أحادية بواسطة طريقة للتقريب التواتري تدعى نظرية التِّرجاف Perturbation Theory: وهو اسم استُعير من الميكانيكا الفلكية. وخلاصة هذه الطريقة هي أن نبدأ بتقريب أولي ثم ندأب على تحسينه عبر سلسلة من التعديلات متضائلة القدر. وعندما نطبق نظرية الترجاف على نظرية الحقول المكماة، نواجه بمقادير لا نهائية يتوجب التخلص منها عبر نظرية إعادة (التنظيم) Neronmalization.

ونظرية الترجاف هذه لا تُجدي نفعاً في حالة الجاذبية الكمومية وذلك لسببين هما: أحدهما، هو أنه عندما تكون الطاقة بمستوى طاقة «بلانك»، فإن الحدود المتتالية في سلسلة الترجاف (أي التعديلات المتتالية) تكون ذات مقادير متقاربة. والتوقف بالسلسلة عند عدد محدد من الحدود لن يقود إلى تقريب صحيح بل يتوجب علينا أن نجمع السلسلة اللانهائية بكاملها.

والآخر هو أنه ليس بالإمكان إعادة تنظيم الحدود الفردية في السلسلة بصورة سوية. ففي كل مرتبة من مراتب التقريب تظهر فئات جديدة من المقادير اللانهائية والتي ليس لها ما يقابلها في نظرية الحقول الكمومية المعهودة. وسبب ظهور هذه المقادير هو أنه عندما (نُكَمّي) Quantize حقل الجاذبية، فإننا نكمي الزمكان نفسه. ففي نظرية الحقول الكمومية العادية يشكل الزمكان خلفية ثابتةً. أما في الجاذبية الكمومية فإن الخلفية لا تكتفي بأن تتفاعل مع الترجحات الكمومية بل تسهم فيها أيضاً.

وأمام هذه الصعوبات فقد جرت محاولات ذات طابع تقني ضيق، هدفها حساب قيمة سلاسل جزئية لا نهائية من حدود سلسلة الترجاف. وتعتبر نتائج هذه الحسابات مؤشراً مشجعاً نهتدي به، ولا سيما فيما يتعلق، بخلو هذه الحسابات خلواً تاماً من مقادير لا نهائية. ومع هذا ينبغي التحلي بالحذر عند الأخذ بنتائج هذه الحسابات، وذلك بسبب التقريبات المجحفة التي تنطوي عليها، ولأن سلسلة الترجاف لم تجمع أبداً ككل. وعلى الرغم من ذلك فإن الجهود قائمة لاستخدام هذه النتائج في حساب قيمة أفضل لنتيجة ردة الفعل على الانفجار الأولي.

ولكن من وجهة نظر أوسع، علينا أن نتوقع بروز معضلات أخرى لا يمكن معالجتها مطلقاً عن طريق جمع سلاسل رياضية. ذلك أن الزمكان المكمى يتّسم بتكوين سببي مترجّح وغير محدد. وعلى مستوى أبعاد بلانك، فإن التمايز بين الماضي والمستقبل يصبح غير واضح. وبهذا الخصوص فلنذكّر بظاهرة الاختراق Tunnelling والتي تُمكّن الإلكترونات في الذرات من النفاذ عبر حواجز من الطاقة لا تستطيع القفز فوقها. وبالمقارنة بهذه الظاهرة، فإن علينا أن نتوقع على مستوى بُعد «بلانك» ظواهر تحظرها نظرية آينشتين الكلاسيكية بما في ذلك إمكانية التنقل بسرعة تفوق سرعة الضوء. أما كيف يمكن لنا أن نحسب احتمالات وقوع هذه الظواهر فهو أمر مايزال بمعظمه مجهولاً من قِبلنا. وفي معظم الحالات فإننا لا نعرف حتى ما هي الأسئلة الصحيحة التي يجب أن نسألها. فليس هناك من نتائج مخبرية نهتدي بها. ولذلك فإن المجال مايزال مفتوحاً أمامنا لنطلق العنان لخيالنا.

ومن أكثر الأفكار شططاً في الخيال والتي يُشار إليها مراراً وتكراراً في المجالات العلمية هي فكرة «التوبولوجية المترجّحة» والتي كان «ويلر» قد أدخل مفهومها الأساسي عام 1957. أما هذا المفهوم فهو كالآتي: في حقل الجاذبية كما هي الحال بالنسبة إلى أي حقل آخر، فإن ترجُحات الفراغ تزداد في القدر كلما أمعن طول موجات الحقل بالقصر. ولقد استقينا هذه النتيجة من مجال الحقل الضعيف. فإذا جاز لنا أن نعممها لتشمل نطاق «بلانك»، فإن ترجُحات التقوس ستصل درجة من العنف يمكنها معها تمزيق الزمكان محدثةً فيه فجوات، ومغيّرة توبولوجيته. ويتخيل «ويلر» الفراغ في حالة هيجان دائم تتكون وتتحلل فيه بصورة مستمرة أنفاق نخرة (وغيرها من التراكيب التوبولوجية التي تفوقها تعقيداً) ذات أطوال بمقياس «بلانك». ولا يمكن رؤية هذا الاضطراب إلاّ على مستوى مقاس «بلانك». وعلى مستوى مقاس أقل دقة فإن الزمكان سيستمر في الظهور صقيلاً.

وهنا يحق الاعتراض: كل تغيُّر توبولوجي يصاحبه بالضرورة ظهور نقطة فريدة في البنية السببية للزمكان. وهكذا فنحن نُواجه بنفس الصعوبات التي نتجت عن معالجة «هوكينك» لانحلال الثقب الأسود Black Hole Decay. ولكن لنفترض أن «ويلر» على صواب، عندها يجب أن نبادر بالسؤال: ما هو القدر الذي تضيفه الترجُحات التوبولوجية إلى طاقة الفراغ؟ وما هو أثر هذه الترجُحات على مقاومة الزمكان (على المستوى قليل الدقة) للتقوس؟ لم يتمكن أحد إلى الآن من تقديم إجابات مقنعة عن هذه الأسئلة. ويعود سبب ذلك بدرجة كبيرة إلى أنه لما تتكون لدينا صورة متماسكة عن عملية التحول التوبولوجي نفسها.

ولإعطاء فكرة عن العقبات التي تقف حائلاً دون أن نتمكن من تكوين مثل هذه الصورة، لندخل في اعتبارنا العملية المشار إليها بالشكل الوارد في الصفحة 110 والذي يعرض تمثيلين لنفس الحدث وهو انقباض نفقٍ نَخِرٍ لتوّه مُخلفاً وراءه قرنين وهميين فضلين في فضاء بسيط الترابط. ففي أحد من التمثيلين نرى الفضاء مقوساً أما في الآخر فنراه منبسطاً.

والآن لنعتبر العملية العكسية أي عملية تكوين نفق نَخِر. فإذا كان احتمال اختفاء نفقٍ نَخِر عبر انقباضه ذا قيمة تزيد على الصفر وجب أن يكون احتمال تكوينه ذا قيمة تزيد على الصفر أيضاً. وهنا نواجهُ بصعوبة جديدة. فإذا اعتبرنا الشكل ـــ ولكن بوتيرة معكوسة للزمن ـــ فإننا نرى فيه قرنين وهميين وقد أخذا بالنمو تلقائياً في الفراغ الكمومي. وفي أحد التمثيلين تبدو الإمكانية معقولة في أن يتصل القرنان ليُكوّنا نفقاً نخراً. أما في التمثيل الآخر، فإن هذه الإمكانية معدومة؛ ومع هذا فإن الوضع الفيزيائي هو نفسه في كل من التمثيلين. ويبدو تكوين النفق النخر معقولاً في التمثيل الأول لأن القرنين الوهميين يظهران متقاربين. إلاّ أن هذا «التقارب» ليس خاصية ذاتية للوضع الفضائي كما نرى بوضوح في التمثيل الثاني. ويقتضي مفهوم «التقارب» وجود فضاء يربو على الزمكان بعدد أبعاده بحيث يكون هذا مغروساً فيه. وإضافة إلى ذلك، فإن هذا الفضاء الأكثر أبعاداً يجب أن يتسم بخصائص فيزيائية تمكن القرنين الوهميين من أن يتبادلا مغزى القرب بينهما. ولكن بهذا لم يعد الزمكان هو الكون؛ بل يغدو الكون شيئاً أوسع. فإذا أردنا التمسك بالنظرة التي تعتبر خصائص الزمكان ذاتية، وليست نتيجة لأمر خارجه، فإن تكوين تصور مترابط للتحولات التوبولوجية يبدو بعيد المنال.

ونأتي إلى صعوبة أخرى تقف في وجه الترجحات التوبولوجية، فهي قد تقوّض الأسس التي يرتكز عليها استقرار عدد الأبعاد الماكروسكوبية للفضاء لأنه إذا أمكن للأنفاق النّخرة أن تتكون تلقائياً، فإن الأنفاق نفسها ستتكون عليها أنفاق أخرى وهكذا دواليك إلى ما لانهاية. فعلى الرغم من أن الفضاء يكون ذا أبعادٍ ثلاثة على مستوى بلانك إلا أنه قد يتطور إلى فضاء ذي أربعةِ أبعادٍ ظاهرية أو أكثر من ذلك على مستوى أكبر. وهذه ظاهرة مألوفة في حالة تشكل «الزَّبد» Foam الذي يتكون بصورة كاملة من سطوح ثنائية الأبعاد، ومع هذا فهو نفسه ذو أبعاد ثلاثة.

وهذه الصعوبات قد حَدَت ببعض الفيزيائيين لأن يقترح أن الوصف التقليدي للزمكان كمتصل (ملتحم) أملس Smooth Contiunum يفشل على مستوى بلانك ويجب أن يستبدل به وصف آخر. أمّا مم يتكون هذا الوصف الآخر فهو أمر لم يتوضح أبداً بصورة تامة. وفي ضوء النجاح الذي لاقاه الوصف المتصلي عبر مقاسات للطول تمتد على قدر يزيد على 10^{40} (وحتى 10^{60} إذا افترضنا أن فشله يتأتى فقط على مستوى بلانك) فإنه ليبدو على القدر نفسه من الأهلية أن نفترض أن الوصف المتصلي هو صحيح على جميع المستويات، وأن التحولات التوبولوجية ليس لها أي وجود.

وحتى لو كانت توبولوجية الفضاء مستقرة، فإن هذا لا يعني بالضرورة أنها بسيطة حتى على المستوى الماكروسكوبي. إذ أنه من الممكن أن يكون للفضاء تركيب زَبَديٌّ قائم فيه منذ البداية، وفي هذه الحالة سوف يكون ممكناً لعدد أبعاده الظاهري أن يفوق عددها الحقيقي. كما أن العكس ممكن، أي أن يكون عدد أبعاده الظاهري أقل من عددها الحقيقي.

وقد ورد هذا الاحتمال الأخير في نظرية كان قد اقترحها كل من (ت. كلوزا) عام 1921 و(أ. كلاين) عام 1926. ففي نظرية «كلوزا وكلاين» هذه فإن الفضاء يكون رباعي الأبعاد بينما يكون الزمكان خماسيًّا. أما السبب الذي يجعل الفضاء يبدو ثلاثي الأبعاد فيعود إلى كون هذه الأبعاد من النوع الأسطواني، كما في حال الكون الذي بحثناه سابقاً ولكن بفارق مهم: فبدل أن يبلغ طول محيط الكون في الاتجاه الأسطواني بلايين السنوات الضوئية، فإنه لا يتعدى بضعاً من وحدات بلانك (ربما 10 أو 100). وبالنتيجة فإن أي مشاهد يحاول أن ينفذ إلى البعد الفضائي الرابع سيعود في الحال إلى نقطة البداية. وفي الواقع فإن محاولة كهذه لا معنى لها لأن الذرات نفسها التي تتكون منها المشاهد

هي أكبر بكثير من المحيط الأسطواني. فالبعد الرابع ــ هو بكل بساطة ــ غير قابل للمشاهدة.

إلاَّ أنه يمكن لهذا البعد الرابع أن يكشف نفسه بطريقة أخرى: كالضوء! إذ بيَّن كل من: «كلوزا وكلاين» أن معالجة الزمكان خماسيِّ الأبعاد الذي وصفناه بنفس الطريقة التي وصف بها آينشتين الزمكان رباعيَّ الأبعاد تظهر تعادل نظريتهما مع نظرية مكسول للحقل الكهرمغنطيسي مضافة إلى نظرية الجاذبية لآنشتين. فالمعادلة التي تحكم تقوس الزمكأن تحوي بصورة ضمنية مقومات الحقل الكهرمغنطيسي. وهكذا فقد توصل «كلوزا وكلاين» إلى استنباط أول نظرية موحدة للحقول بأن تمكنا من إعطاء تفسير هندسي للإشعاع الكهرمغنطيسي.

ومع هذا فإنه يمكن القول أن نظرية «كلوزا وكلاين» كانت ناجحة أكثر مما ينبغي. فعلى الرغم من نجاحها في توحيد نظريتي مكسول وآينشتين، فإنها لم تأتِ بظواهر جديدة ولذلك لم يكن بالإمكان المفاضلة بينها وبين نظريات أخرى. وسبب ذلك أن «كلوزا وكلاين» قد وضعا قيوداً على الطريقة التي يمكن للزمكان أن يتقوس فيها في الأبعاد الإضافية، فلو رُفعت هذه القيود لأمكن للنظرية أن تتنبأ بظواهر جديدة؛ غير أن هذه الظواهر لا تنطبق على الواقع، ولهذا فقد اعتبرت هذه النظرية لسنين عديدة مجرد طرفة جميلة ووضعت على الرَّف.

وفي الستينيات أُنزلت نظرية «كلوز وكلاين» عن الرَّف حين تبين أنه بالإمكان إعادة صياغة النظريات «المعيارية الجديدة New Gauge Thiories ــ والتي كانت موضع اهتمام متزايد ــ على هيئة نظرية «كلوزا وكلاين»، إلاَّ أنه في هذه الحالة لا يزود الفضاء ببعد إضافي واحد بل بعدة أبعاد ماكروسكوبية. وقد أخذ يبدو كما لو أن تفسير الفيزياء كلها سيتم عبر مفاهيم هندسية. وعندها صار أمراً ذا أهمية أن نسأل عمَّا يمكن أن يحدث إذا ما رفعنا القيود عن التقوس في الأبعاد المرصوصة.

ومن الأمور المتوقع حدوثها هو قيام ترجُحات في التقوس في هذه الأبعاد الإضافية تجسِّد نفسها كجُسيمات ذات كتل، فإذا كان طول المحيط في الأبعاد الإضافية هو بحدود 10 من وحدات «بلانك»، فإن كتلة أي من هذه الجسيمات ستكون بحدود عُشر كتلة بلانك أي بحدود الميكروغرام. ولكون كمية الطاقة اللازمة لتوليد هذه الجسيمات هائلة، فإن إنتاجها يكاد يكون مستحيلاً علينا. وهكذا فليس هناك ــ من الناحية العملية ــ أية أهمية إذا وضعنا قيوداً على ترجُحات التقوس أم لم نضع. ومع هذا تبقى هناك صعوبات أهمها أن التقوس الحاد في الأبعاد الإضافية يقود إلى كثافة عالية جداً للطاقة في الفراغ. وهذه تتعارض مع النتائج المخبرية.

إلا أنه لم تجرِ حتى الآن دراسة نظريات من نوع «كلوزا وكلاين» كغاية في حد ذاتها. ولذلك فإن دورها في الفيزياء لمّا يتضح. غير أن دراستها قد نشطت في السنوات الأخيرة وأعيد التمحيص فيها من جديد. ويعود سبب ذلك إلى علاقتها بالتعميم الذي أجري على نظرية آينشتين والمسمى بالجاذبية الأعظم Super Gravity. وقد استنبط هذه النظرية عام 1976 كل من (د.ز. فريدمان) و(ب.ف. نويفنهويزن) و(س. فِرّارا) «ثم في صيغة محسنة» كل من (س. دزر) و(ب. زومينو).

ومن المآخذ على النظريات التي هي من نوع «كلوزا وكلاين» أن الجسيمات التي توجدها لاتأتي إلاَّ بعزوم دوران سَبيني بالمقادير 2h,ħ,0. وحتى هذه الجسيمات فهي إما أن تكون معدومة كتل السكون، أو ذات كتل عظمى. وليس هناك في هذه النظريات مكان على الإطلاق لجسيمات المادة الاعتيادية والتي يتميز معظمها بعزم دوران سَبيني قدره ½h. ولكن إذا استبدلنا بنظرية آينشتين نظرية الجاذبية الأعظم، وعالجنا الزمكان بطريقة «كلوزا وكلاين» فإننا نتوصل ــ بالنتيجة ــ إلى توحيد حقيقي لجميع أصناف الاسبينات.

وفي النموذج الشائع حالياً لنظرية «كلوزا وكلاين الأعظم» فإن عدد الأبعاد المضافة إلى الزمكان هو سبعة، وتحدّد هذه الأبعاد السبعة فضاءً يتميز بتوبولوجية كرة سباعية Sphere - 7، وله خواص ذاتية رائعة. وأما الناتج فهو نظرية خصبة ومعقدة بصورة فريدة وتقود إلى تعددات أعظمية هائلة من الجسيمات. أما كتل سكون هذه الجسيمات، فهي مازالت كالحالة السابقة، أي إما معدومة أو كبيرة جداً. أما الآن، فمن المحتمل أن نُكسِب بعض هذه الجسيمات كتلاً واقعية وذلك عن طريق «خرقنا» لتناسق الكرة السباعية. وكذلك الحال بالنسبة للطاقة العالية للفراغ الكلاسيكي فإنها تظهر في هذه النظرية أيضاً. ولكن يُحتمل أن تمحوها في هذه الحالة طاقة سالبة للفراغ الكمومي. أمَّا إذا كان النجاح من نصيب هذه الاستراتيجيات التي تسعى لتقويم النظرية، فهو أمر غير معلوم حتى الآن. إذ إننا مازلنا بحاجة إلى بذل الكثير من الجهد كي نتمكن من تحديد ما تنطوي عليه النظرية بالضبط.

والآن، لو أمكن لآينشتين أن يعود إلينا بروحه، وأن يشهد ما حل بنظريته، فإنه سيُدهَش بكل تأكيد. وفي اعتقادي فإنه سيكون مسروراً أيضاً. سيكون مسروراً أن يجد الفيزيائيين ــ أخيراً ــ وبعد سنوات من التردد قد بدأوا الأخذ بوجهة نظره في أن النظريات ذات الجمال الرياضي تستحق الدراسة حتى ولو ظهر أنها بدون علاقة مباشرة مع الواقع. وسيكون مسروراً أن يجد الفيزيائيين الآن ولديهم أمل كبير بالوصول إلى نظرية موحدة للحقول. كما أنه سيكون مسروراً أيضاً بصورة خاصة ليرى حلمه القديم بتفسير الفيزياء عبر مفاهيم هندسية على طريق التحقيق.

ولكنه سيُدهش على كل حال، لأن النظرية الكمومية مازالت تقف ناصعة النقاء «ثابتة القدم» وسط كل ما تألَّب من أحداث تغني نظرية الحقول وتغتني بها. فآينشتين لم يؤمن يوماً بأن النظرية الكمومية تشكل تعبيراً عن الحقيقة النهائية. وهو لم يستَسِغ مطلقاً ما تنطوي عليه هذه النظرية من عدم التحديد. وكان ثابت الاعتقاد بأنها لابد وأن يستبدل بها في يوم من الأيام نظرية غير أحادية للحقول. وما حدث هو العكس تماماً. إذ إن النظرية الكمومية قد غَزَت نظرية آينشتين وغيَّرتها.



الفيزياء الكمومية للسفر في الزمن

قد يرفض المنطق إمكانية مثل هذا السفر، لكن قوانين الفيزياء لا تحول دون ذلك.

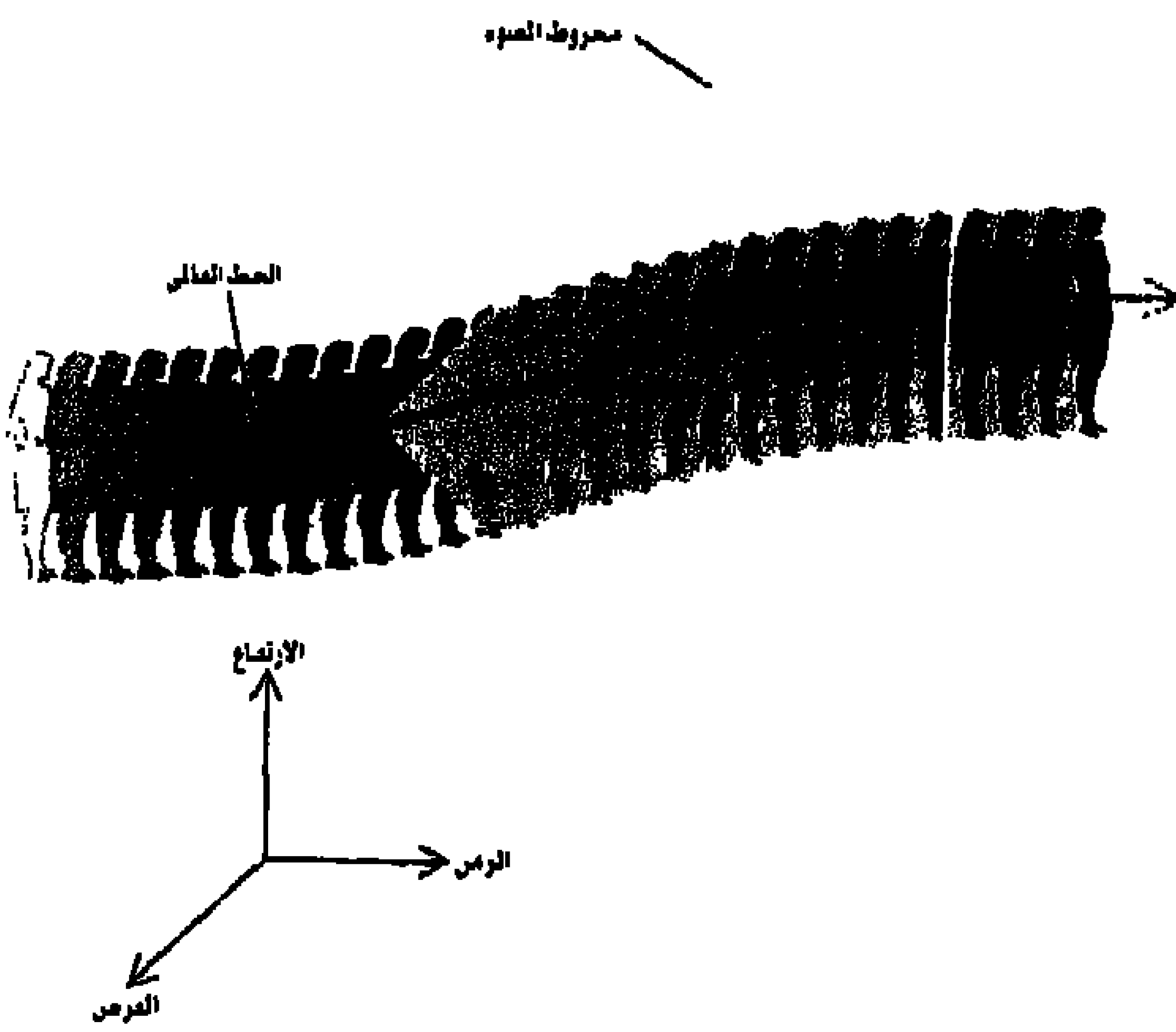
(د. دونش) ــ (م. لوكوود)

تصوَّر معنا أن صديقتنا صفاء تحتفظ في مرآبها بآلة تتيح لها السفر في الزمن، وأنها استعملتها في الليلة الماضية لزيارة جدها في عام 1934، أثناء فترة خطوبته من جدتها. وقد أقنعته بهويتها بذكر أسرار عائلية لم يكن قد باح بها لأحد حتى ذلك التاريخ. وقد أدهشه ذلك بشدة، لكن الذي سيلي كان أدهى. فعندما أخبر خطيبته أثناء الغداء بأنه قد قابل لتوه حفيدتهما المستقبلية أجابته السيدة معبِّرة عن شكوكها بسلامة عقله وعن استيائها من هذا الادعاء. فسخت خطوبتهما ولم ينجبا قط تلك الطفلة التي كانت ستصبح أمَّ صفاء.

فكيف يمكن لصفاء أن تجلس اليوم لتحدثنا عن مغامراتها؟ وإذا كانت أمها لم تولد قط فكيف ولدت هي نفسها؟ إن السؤال الحقيقي هو التالي: عندما تعود صفاء إلى عام 1934، هل تستطيع، أم لا تستطيع، أن تتسبب في قطع علاقة جديها العاطفية؟ إن الجواب عن هذا السؤال يخلق مشكلات عديدة، سواء كان نفياً أو إيجاباً. فإذا استطاعت صفاء أن تحول دون ولادتها فالتناقض واضح. وإذا لم تستطع، فإن عجزها يتعارض مع المنطق المعقول: إذ ما الذي يحول دون أن تتصرف على هواها؟ هل يوجد شيء غامض يشل قدرتها كلما حاولت أن تنفذ بعض رغباتها؟

إن ظروفاً كهذه ــ وهي شكل مبسط من «مفارقة الجد» التقليدية، تلك المفارقة التي تجعل الجد يُقتل بيد حفيده القادم من المستقبل ــ تُعتبر، في العادة، أمراً منافياً لفكرة السفر في الزمن ومع ذلك فمن المدهش أن قوانين الفيزياء لا تحول دون حدوث مثل هذه المغامرات.

وقد ناقش فيلسوف أكسفورد (م. دوميت) مفارقة أخرى غالباً ما تحدث في روايات الخيال العلمي. إنها تتصور ناقداً فنياً يأتي من المستقبل لزيارة رسام في القرن العشرين يعتبره معاصرو الناقد فناناً عظيماً. وعندما يشاهد الناقد لوحات الرسام الحالية يجد أنها متوسطة المستوى ويستنتج أن هذا الرسام لم يُنتج بعد اللوحات الرائعة التي أثارت إعجاب أجيال المستقبل. وعندئذ يُطلع الناقد هذا الرسام على كتاب يحوي صوراً لهذه الأعمال المتأخرة، فيحتال الرسام في إخفاء هذا الكتاب ويجبر الناقد على الانصراف من دونه، ثم يكتفي بتقليد صور الكتاب بعناية كبيرة على شكل لوحات.



يتراكب المكان والزمان في كيان واحد ذي أربعة أبعاد اسمه الزمكان. نمثل هنا بعدين مكانيين والبعد الزمني. يربط الخط العالمي كل الحوادث التي تطرأ على حياة الإنسان بالزمكان. وبما أننا كائنات ذات حجم، فإن الخط العالمي لكل منا أشبه بدودة يتزايد طولها من المهد إلى اللحد منه بالخط. لكن الخطوط العالمية للأشعة الضوئية، المنتشرة في كل الاتجاهات بدءاً من حادث ما، تؤلف بمجموعها مخروطاً في الزمكان اسمه مخروط الضوء. ولا يمكن لأي خط عالمي، أياً كان صاحبه ــ بشراً أو جماداً ــ أن يتجاوز المخروط الزمني المنطلق من أية نقطة زمكانية من ماضيه.

وبذلك تكون المقلّدات موجودة لأنها نسخ من اللوحات، واللوحات موجودة لأنها نسخ من المقلّدات. وعلى الرغم من أن هذه القصة ليس فيها أي تناقض، فإنها تنطوي على شيء خاطئ جداً. إنها ترمي إلى إعطائنا اللوحات دون أن يضطر أحد إلى بذل جهد فني كي يبتكرها ــ نوع من «الوجبة الفنية المجانية».

لقد اعتاد الفيزيائيون، من خلال قناعتهم بهذه الاعتراضات، أن يتذرعوا بمبدأ تسلسل زمني لا يسمح بالسفر باتجاه الماضي. والسفر باتجاه واحد نحو المستقبل لا يطرح مشكلات من هذا القبيل. تتنبأ نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين بإمكانية أن يتوغل

ملاحو الفضاء (ممن يتاح لهم أن ينجزوا رحلة ذهاب وإياب إلى الأرض بتسارعات كافية) عشرات السنين في المستقبل دون أن يشيخوا سوى سنة أو سنتين؛ إلا أن من المهم أن نميز بين التنبؤات من هذا القبيل، التي تقتصر على إدهاشنا، وبين المعالجات التي قد تخرق قوانين الفيزياء أو المبادئ الفلسفية التي يمكن تبريرها بأسلوب مستقل.

سنشرح فيما يلي لماذا لا ينتهك السفر باتجاه الماضي أياً من هذه القوانين. وفي سبيل ذلك علينا أولاً أن نفحص مفهوم (مبدأ) الزمن ذاته كما يفهمه الفيزيائيون. ففي نظريتي أينشتاين النسبية الخاصة والعامة تنضم إحداثيات المكان الثلاثة مع الإحداثي الزمني لتصنع كلها معاً زمكاناً[1] ذا أربعة أبعاد. ففي حين يتألف المكان من نقاط فضائية يتألف الزمكان من نقاط زمكانية، أو أحداث؛ أحداث يمثل كل منها موضعاً معيناً في زمن معين. فحياتك تتخذ في الزمكان شكل «دودة» ذات أربعة أبعاد، نهاية ذيلها تقابل حادث ولادتك، ومقدمة رأسها تمثل حادث وفاتك. والنظرة إلى جسم ما، في لحظة معينة، تريك مقطعاً عرضياً ذا ثلاثة أبعاد من هذه الدودة الطويلة الدقيقة ذات الالتواءات المعقدة. أما الخط الذي تقع الدودة على طوله (بإهمال ثخنه) فيسمى الخط العالمي لهذا الجسم.

وعند كل نقطة من خطك العالمي تكون الزاوية التي يصنعها هذا الخط مع محور الزمن قياساً لسرعتك. والخط العالمي للشعاع الضوئي يُرسم نموذجياً كمستقيم يصنع زاوية 45 درجة مع محور الزمن، والومضة الضوئية المنتشرة في كل الاتجاهات تشكل مخروطاً في الزمكان يسمى مخروط الضوء. والفرق المهم بين الفضاء العادي والزمكان هو أن الخط العالمي ــ بخلاف الخط المرسوم على الورق مثلاً ــ لا يمكن أن يتخذ شكل التواءات اعتباطية. ولما كانت الأشياء كلها لا يمكن أن تتحرك بأسرع من الضوء، فإن الخط العالمي لأي شيء مادي (طبيعي) لا يمكن أن يخرج عن مخروط الضوء الصادر عن حدث وقع في ماضي ذلك الشيء. ويقال عن الخطوط العالمية التي تستجيب لهذه الخاصية إنها من نوع الزمن. والزمن، كما يقاس بالميقاتيات، يتزايد باتجاه واحد على طول الخط العالمي.

تتطلب نظرية آينشتاين النسبية الخاصة أن تكون الخطوط العالمية، للأشياء الطبيعية، من النوع الزمني. وتتنبأ معادلات الحقل في نظريته النسبية العامة بأن الأجسام العظيمة الكتلة، كالنجوم والثقوب السوداء، تشوه الزمكان وتحني الخطوط العالمية. ذلك هو أصل التثاقل في هذه النظرية: يتلولب الخط العالمي للأرض حول الخط العالمي للشمس، الذي يتلولب هو الآخر حول الخط العالمي لمركز مجرتنا.

هب أن الزمكان صار مشوهاً لدرجة أن بعض الخطوط العالمية تشكل حلقات مغلقة. فأمثال هذه الخطوط ستكون من نوع الزمن على طول مسارها. ومع أنها تتمتع موضعياً بكل خصائص المكان والزمان العادية، فإنها يمكن أن تكون ممرات إلى الماضي. وإذا حاولنا أن نتتبع بدقة منحنياً من هذا القبيل، مغلقاً ومن النوع الزمني، ونحن ندور عليه من البداية للنهاية، فقد نصطدم بأنفسنا

---

[1] نحت من زمان ــ مكان Space-Time. (المحرر)

الماضية وتُدفع جانباً. أما إذا سلكنا جزءاً من هذا المنحني فسنستطيع أن نعود إلى الماضي وأن نشارك في أحداثه. نستطيع أن نتصافح مع أنفسنا عندما كنا أكثر شباباً، أو أن نزور أسلافنا إذا كانت الحلقة كبيرة بدرجة كافية.

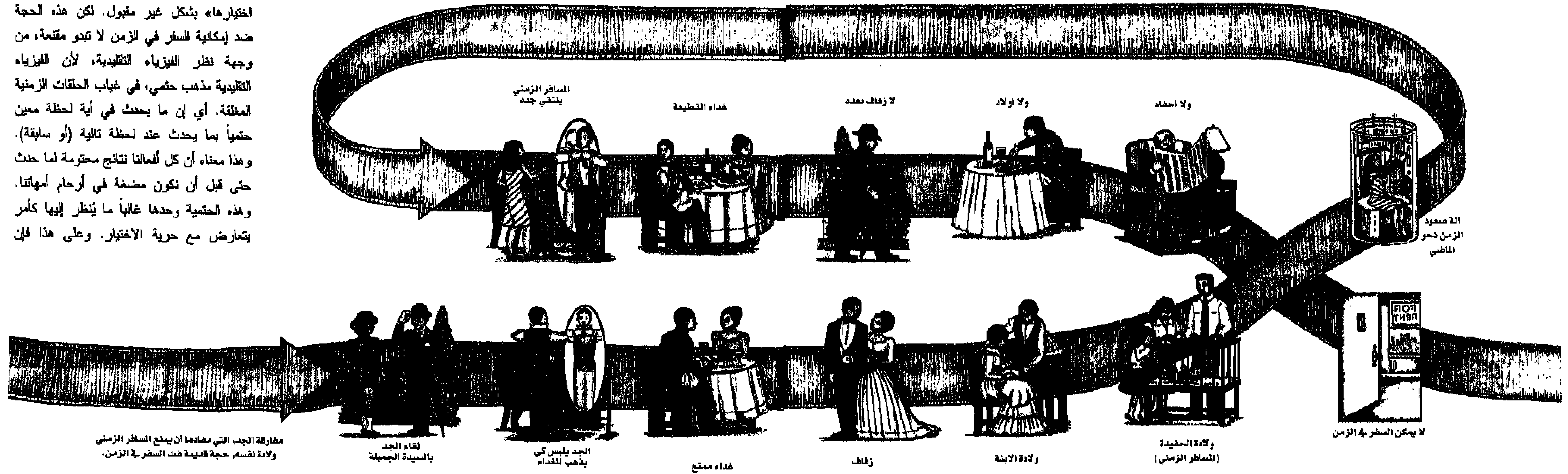
ولهذه الغاية علينا إما أن نستعمل حلقات طبيعية من النوع الزمني، وإما أن نخلق مثل هذه الحلقات بتشويه الزمكان وتمزيق نسيجه. فآلة السفر في الزمن ليست إذاً مركبة من نوع خاص بل إن من شأنها أن توفر طريقاً نحو الماضي يمكن أن تسلكه مركبة عادية، كالسفينة الفضائية مثلاً. لكن الحلقات ذات النوع الزمني (أو قل الأنبوب الزمني المغلق الذي يحيط بها) تختلف عن الطريق المكاني العادي بأنها ستستنفد إذا سلكها عدد لانهائي من العربات، لأنها لا يمكن أن تحوي سوى عدد محدود من ديدان الخطوط العالمية. وإذا سلكها المرء للعودة إلى حادث معين فسيصادف في طريقه كل من سلكها قبله، أو سيسلكها، نحو ذلك الحادث.

هل يحوي عالمنا، الآن أو سيحوي في المستقبل، حلقات من نوع الزمن؟ إننا لا نعلم جواب هذا السؤال؛ لكن لدينا حدسيات نظرية عديدة عن الكيفية التي قد تتشكل بها. منها مثلاً الحل الذي اكتشفه (ك. كوديل) لمعادلات آينشتاين التي تصف الحلقات ذات النوع الزمني. وهو حل يقول بأن العالم كله في حالة دوران (طبقاً للحقائق المتاحة حالياً فإن العالم لا يدور). ومنها أيضاً أن حلقات من النوع الزمني تظهر في حلول معادلات آينشتاين التي تصف الثقوب السوداء الدوّامة. لكن هذه الحلول تهمل المادة التي تسقط في الثقب الأسود، ومازال مدى انطباقها على الثقوب السوداء الواقعية موضع جدل. زد على ذلك أن المسافر في الزمن من شأنه أن يؤسر ضمن الثقب الأسود بعد أن يصل إلى الماضي، إلا إذا كان معدل دوران (تدويم) الثقب الأسود أكبر من قيمة حرجة. هذا علماً بأن الفيزيائيين الفلكيين لا يعتقدون بأن سرعة دوران الثقوب السوداء الطبيعية التشكل تبلغ هذه القيمة العالية. ربما كان بإمكان حضارة أكثر تقدماً من حضارتنا أن تحقن مادة في الثقوب السوداء كي تبلغ سرعة دورانها حداً يكفي لنشوء حلقات زمنية مأمونة، إلا أن معظم الفيزيائيين يستبعدون هذه الإمكانية.

لقد تصور (ج.أ. ويلر) الفيزيائي في جامعة برنستون، طريقاً مختصراً عبر الزمكان سمّاه ثقباً دودياً. ثم بيّن (ك.س. ثورن)، من معهد كاليفورنيا التقانة، وسواه كيف يجب تحريك طرفي الثقب الدودي كي يصنعا حلقة من نوع الزمن. وتدل حسابات حديثة أجراها (ر. كوت)، من برنستون، على أن خيطاً كونياً (وهذا أيضاً بناء نظري لم يتأكد وجوده ولا عدمه) يستطيع أن يشكل حلقة من نوع الزمن عندما يمر بسرعة كبيرة بالقرب من خيط كوني آخر.

إننا اليوم بعيدون تماماً عن اكتشاف أي من هذه الحلقات الزمنية. ولكنها قد تصبح في متناول الحضارات المستقبلية عندما تحاول تنفيذ مفارقات السفر في الزمن. لذلك لنفحص المفارقات بعناية كي نحدد المبادئ ــ إن وجدت ــ التي يمكن أن تنتهكها هذه المفارقات طبقاً لكل من الفيزياء التقليدية والكمومية.

إن الفيزياء التقليدية تؤكد، بما لايقبل الشك، أن على صناء أن تنفذ ــ عندما تصل إلى الماضي ــ الأعمال التي يسجل التاريخ أنها نفذتها. ويرى بعض الفلاسفة أن هذه المهمة تحد من «حرية اختيارها» بشكل غير مقبول. لكن هذه الحجة ضد إمكانية السفر في الزمن لا تبدو مقنعة، من وجهة نظر الفيزياء التقليدية، لأن الفيزياء التقليدية مذهب حتمي، في غياب الحلقات الزمنية المغلقة. أي إن ما يحدث في أية لحظة معين حتمياً بما يحدث عند لحظة تالية (أو سابقة). وهذا معناه أن كل أفعالنا نتائج محتومة لما حدث حتى قبل أن نكون مضغة في أرحام أمهاتنا. وهذه الحتمية وحدها غالباً ما يُنظر إليها كأمر يتعارض مع حرية الاختيار. وعلى هذا فإن

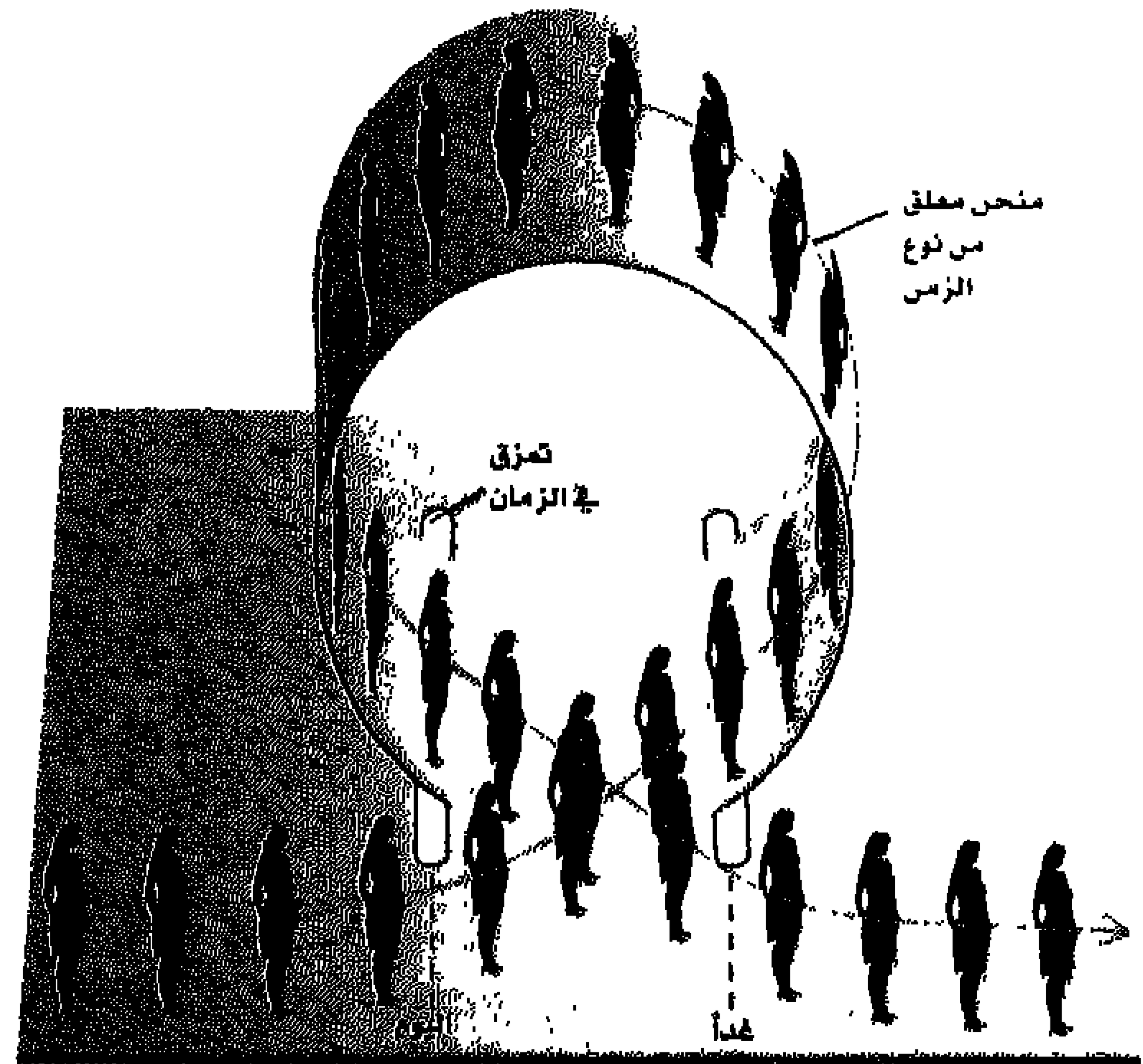


مفارقة الجد، التي مفادها أن يمنع المسافر الزمني ولادة نفسه، حجة قديمة ضد السفر في الزمن.

السفر في الزمن لا يحد من حرية الاختيار بأكثر مما تحد الفيزياء التقليدية نفسها من هذه الحرية.

إن جوهر مفارقة الجد لا يكمن في انتهاك حرية الاختيار بل في انتهاك مبدأ أساسي يقوم عليه العلم والتفكير المنطقي السائد، نسميه مبدأ **الاستقلال الذاتي «المحلي»** Autonomy. وطبقاً لهذا المبدأ نستطيع أن نخلق في جوارنا المباشر أي تشكيل مادي نتيجة قوانين الفيزياء محلياً، دون أن نعبأ بما يحدث في سائر أنحاء الكون. فليس علينا، عندما نقدح عود ثقاب، أن نخشى الفشل بسبب أن الكواكب قد تكون، مثلاً، في تشكيل يحول دون نجاح هذه العملية. فالاستقلال الذاتي خاصية منطقية من المرغوب جداً أن تتضمنها قوانين الفيزياء. إذ إن هذا المبدأ هو مبدأ رئيسي لكل علم تجريبي: فنحن نرى أن من المسلم به إمكان إعداد أجهزتنا في أي تشكيل تبيحه قوانين الفيزياء وأن سائر الكون سيتدبر أمر نفسه قبل ذلك.

في غياب الحلقات من النوع الزمني تتوافق كل من الفيزياء التقليدية والفيزياء الكمومية مع مبدأ الاستقلال الذاتي. ولكن الفيزياء التقليدية عند وجود هذه الحلقات لا تتوافق مع ذلك المبدأ بسبب ما يسميه (ج.ل. فريدمان) (من جامعة وسكنسن) وسواه مبدأ **التوافق «التماسك»** Consistency. يقول هذا المبدأ إن التشكيلات المادية الوحيدة التي يمكن تنفيذها محلياً هي التشكيلات الذاتية التوافق عالمياً. وبموجب هذا المبدأ يستطيع العالم خارج المختبر أن يقيد أفعالنا الداخلية فيزيائياً، حتى ولو كان كل ما نفعله متوافقاً محلياً مع قوانين الفيزياء. ونحن لا نشعر عادة بهذا التقييد لأن مبدأي الاستقلال الذاتي والتوافق لا يتعارضان أبداً إلا بوجود حلقات من النوع الزمني.



يمكن لمنحن مغلق من نوع الزمن أن يتشكل إذا انحنى الزمكان حتى يشكل حلقة مغلقة. فإذا سلك إنسان منحنياً من هذا القبيل خاصاً به، بادئاً رحلته غداً ومنطلقاً في الزمان، فإنه سينتهي إلى اليوم (الذي هو أمس غده ذاك).

لا يوجد في الفيزياء التقليدية سوى تاريخ واحد: إن التوافق يقتضي من صفاء، مهما حاولت أن تغير سير أحداث التاريخ، أن تؤدي العمل الذي أوكله تاريخها السابق إليها. إن بإمكانها أن تزور جدها. وقد تصبح الجدة المستقبلية لصفاء قلقة على حالة الجد الصحية عندما يروي لها ما حدث له مع حفيدتهما، إنه متأثر ويطلب يدها فتقبل عرض الزواج منه. وليس هذا بالشيء الممكن حدوثه فحسب، بل إن الفيزياء التقليدية تحتم حدوث أشياء من هذا القبيل. والخلاصة أن صفاء لا تستطيع أبداً أن تغير الماضي، بل تصبح جزءاً منه.

ولكن ماذا لو أرادت صفاء أن تثور على التاريخ؟ لنتصور أنها سافرت نحو الماضي لتلاقي نفسها عندما كانت أصغر سناً (سنقول: صنوها)، وأن صنوها الأصغر يسجل، في أثناء هذا اللقاء، ما تقوله صفاء؛ وفي الوقت المناسب، وقد أصبح الصنو صفاء الأكبر، يحاول الصنو متعمداً أن يقول شيئاً آخر. فهل يجب أن نفترض، بما ينافي العقل، أن قوة خفية لا تقاوم تجبر الصنو على أن يلفظ الكلمات نفسها التي لُفظت في الماضي على عكس عزمه السابق؟ من الممكن لصفاء أن تبرمج إنساناً آلياً بحيث يتكلم بدلاً منها: فهل سيجد هذا الإنسان الآلي نفسه مجبراً على الخروج عن البرنامج الذي صُمم له؟

إن الفيزياء التقليدية تجيب عن هذا السؤال بنعم: هناك حتماً شيء يمنع صفاء، أو الإنسان الآلي، من الخروج عن خط الأحداث التي جرت في الماضي. وليس ضرورياً أن يكون هذا الشيء مثيراً: إذ يكفي نشوء أي شيء من الأشياء المألوفة. فقد تختل مركبة صفاء، أو تطرأ علّة على برنامج الإنسان الآلي. ومهما يكن من أمرٍ، فإن التوافق يُحتّم سقوط مبدأ الاستقلال الذاتي.

لنعد الآن إلى قصة الناقد الفني المسافر في الزمن. سنطلق على انتهاك المعقولية اسم مفارقة المعرفة (إن مفارقة الجد هي مفارقة على صعيد مبدأ الاتساق). ونعطي هنا لكلمة «معرفة» معنى موسعاً: معنى يضم اللوحة الزيتية والمقالة العلمية وأية قطعة في آلة وأي كائن حي. إن مفارقات المعرفة تنتهك المبدأ القائل بأن المعرفة لا يمكن ان تأتي إلى الوجود إلا من خلال حل مسألة ما، كمسألة التطور البيولوجي أو التفكير البشري. ويبدو أن السفر في الزمن يبيح للمعرفة أن تنساب من المستقبل إلى الماضي وبالعكس، فتسلك مساراً حلقياً ذاتي التوافق، دون أن يُضطر أي امرئ، أو أي شيء، إلى التصارع مع المشكلات المناظرة. علماً بأن الاعتراض الفلسفي هنا لا يستند إلى فكرة أن حاملات المعرفة المصنعة بشرياً قد نُقلت نحو الماضي — إنها عنصر «الغذاء المجاني». أي إن المعرفة المطلوبة لاختراع الحاملات لا تتوافر من الحاملات ذاتها.

إن الأحداث الفيزيائية تبدو، في مفارقات اللاتوافق، مقيدة بأشد مما تعودناه، ولكنها تكون أضعف تقييداً من ذلك في مفارقات المعرفة. فحالة الكون، على سبيل المثال، قبل وصول الناقد الفني لا تحتِّم من سيأتي، أو ما سيأتي، من المستقبل، في حال مجيء أي إنسان، ولا ما سيحمل معه. ذلك أن القوانين الحتمية للفيزياء التقليدية تبيح للناقد أن يجلب معه لوحات رائعة أو لوحات رديئة، أو ألا يحمل أية لوحات. ولئن كانت هذه اللاحتمية ليست ما نتوقعه عادة من الفيزياء التقليدية، إلا أنها ليست عائقاً أساسياً ضد السفر في الزمن. والواقع أن هذه اللاحتمية تتسع لإضافة مبدأ آخر للقوانين التقليدية، مبدأ يقول بأن المعرفة لا يمكن أن تنشأ إلا كنتيجة لعمليات حل المسائل.

لكن هذا المبدأ يناقض مبدأ الاستقلال الذاتي كما رأيناه في مفارقة الجد، إذ ما الذي يمنع أن تحمل صفاء مخترعات جديدة تذهب بها نحو الماضي وتعرضها أمام من يفترض أنهم مخترعوها الأصليون؟ وهكذا نرى أن الفيزياء التقليدية تستطيع أن تتقبل هذا النوع من السفر الزمني الذي يُعتبر عادة من قبيل المفارقة، ولكن على حساب التضحية بمبدأ الاستقلال الذاتي. وبالتالي فإن التحليل التقليدي لا يزيل التناقض كلياً.

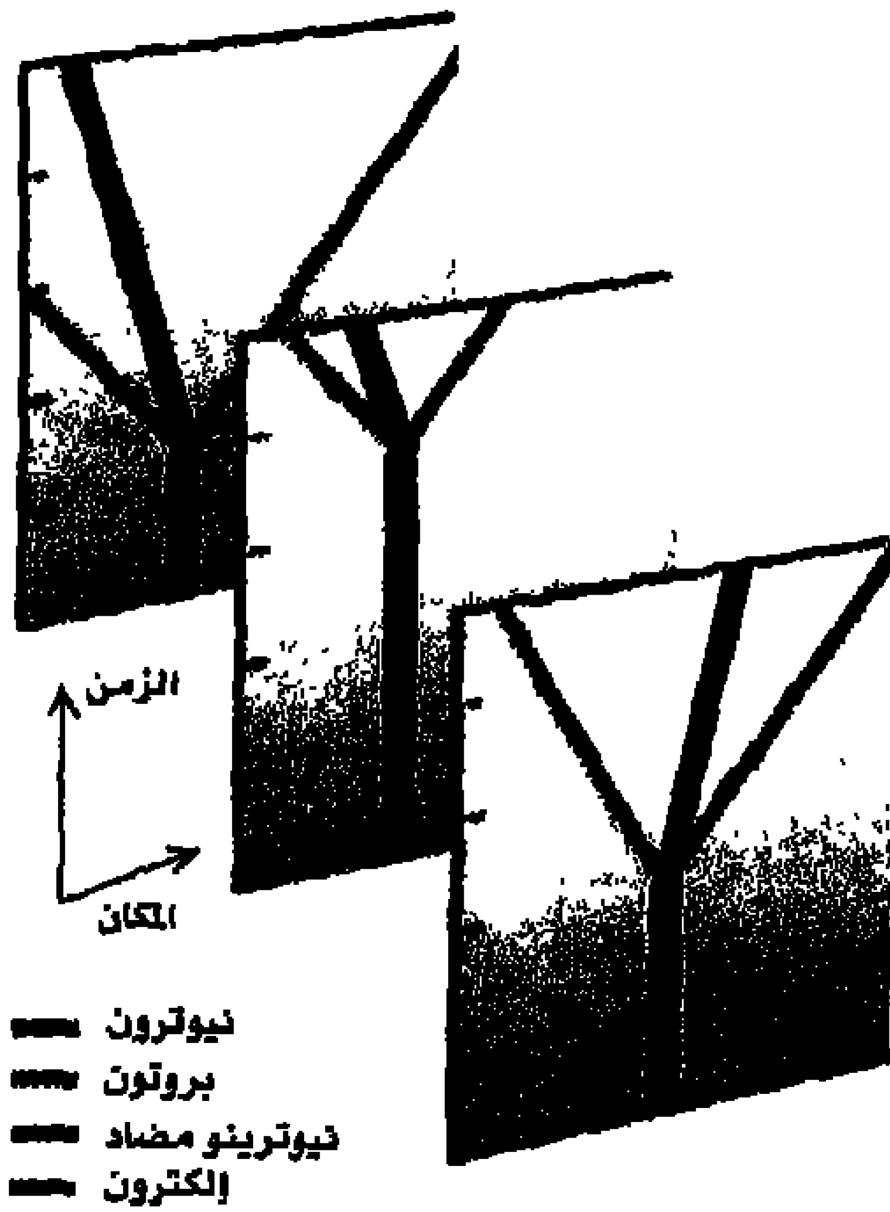
لكن هذا كله يبدو لنا ضرباً من النظريات الأكاديمية، لأن الفيزياء التقليدية مغلوطة. ولئن كانت نتائجها قريبة جداً من الواقع في ظروف عديدة، إلا أنها تكون بعيدة جداً عنه عند معالجة الحالات التي تتضمن منحنيات زمنية مغلقة.

إننا نعلم منذ فترة طويلة أن الحلقات الزمنية، إذا وجدت، لا يمكن أن تدرك إلا من خلال ميكانيك الكم. وقد برهن (س.و. هوكنك)، من جامعة كامبردج، على أن التأثيرات الكمومية إما أن تمنع تشكل حلقات زمنية أو أن تدمّر كل مسافر زمني يقترب من أي حلقة زمنية. وبموجب حسابات هوكنك، التي تستخدم تقريباً يُهمل التأثيرات التثاقلية للحقول الكمومية، يتبين أن تفاوتات هذه الحقول تبلغ قيماً لا نهائية في جوار الحلقات الزمنية. والعمليات التقريبية لا بد منها إلى أن نكتشف كيفية تطبيق نظرية الكم تطبيقاً تاماً على التثاقل، ولكن الزمكانات التي تحوي حلقات زمنية تجعل طرق الحسابات التقريبية الحالية تبلغ مدى كبيراً من الموثوقية عند التطبيق. ويسود الاعتقاد بأن اللانهايات التي تظهر في حسابات هوكنك لا تعني أكثر من قصور هذه الأساليب. أي إن التأثيرات الكمومية، التي سنشرحها، من شأنها أن تُيسّر فعلاً السفر في الزمن، لا أن تحول دونه.

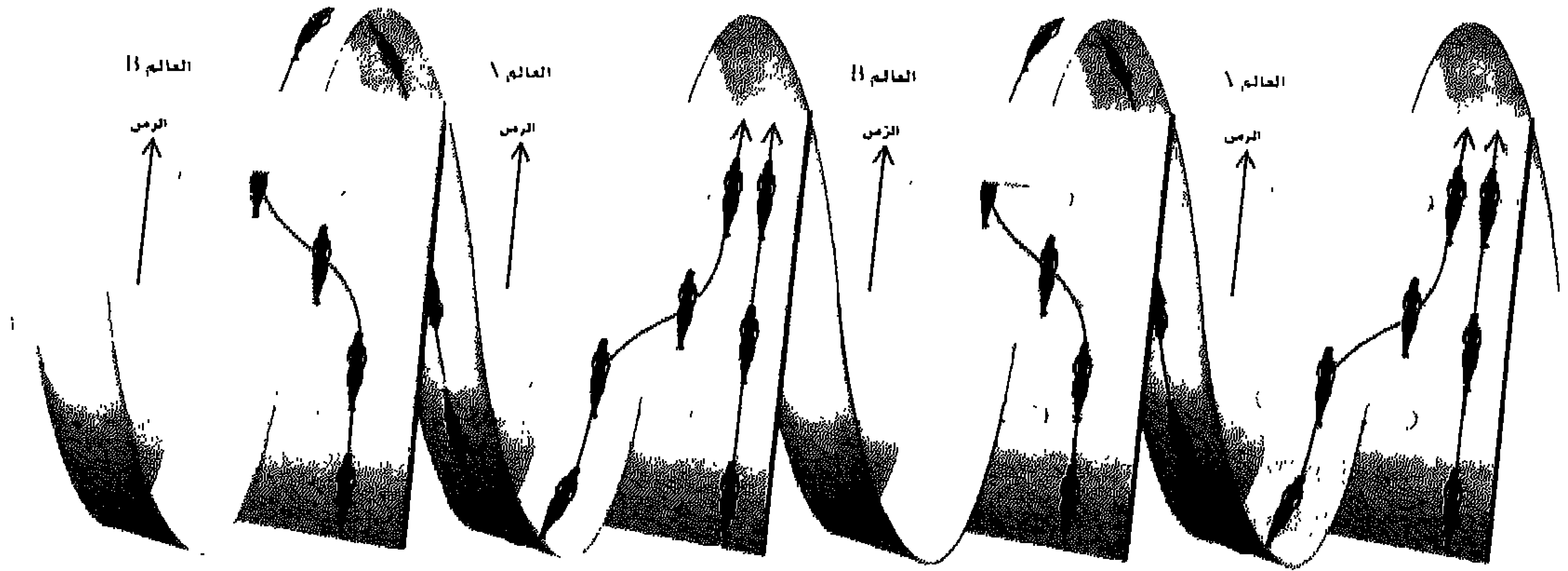
إن ميكانيك الكم يمكن أن يستلزم وجود منحنيات زمنية مغلقة. وهذه الحلقات، على الرغم من صعوبة اكتشافها في الأمداء الكبيرة، يمكن أن توجد بكثرة في الأمداء دون المجهرية حيث تسود التأثيرات الكمومية. ولئن كنا لا نملك حتى اليوم أية نظرية كمومية مُرضية تماماً للتثاقل، فإن لدينا من النظريات التقريبية المطروحة ما يكفي لتبيان أن الزمكان، رغم مظهره الممهد في الأمداء الكبيرة، ذو بنية إسفنجية ذات أنفاق دودية في المجال دون المجهري، إضافة إلى حلقات زمنية تصعد الزمن نحو الماضي في غضون 10^{-42} من الثانية تقريباً. وكل ما نستطيع قوله بهذا الصدد هو أن الجسيمات دون المجهرية الموجودة فينا وفيما حولنا قادرة على أن تسافر في الزمن عدداً لا يُحصى من المرات.

والأهم من ذلك أن ميكانيك الكم قادر على حل مفارقات السفر في الزمن. وهذه النظرية هي أفضل نظرية فيزيائية أساسية لدينا، وتشكل ابتعاداً جذرياً عن وجهات النظر التقليدية السائدة، لأنها، بدلاً من أن تتنبأ بيقين تام بكل ما سنرصده، فإنها تتنبأ بكل ما يمكن أن ينتج من عملية الرصد وباحتمال معين لكل نتيجة. فالنيوترون، مثلاً، يتفكك (إلى بروتون وإلكترون ونيوترينو مضاد)، إذا انتظرناه، في غضون عشرين دقيقة تقريباً، ولكنه قد يتفكك فوراً أو يعيش أكثر من ذلك بما لا يقاس. فكيف سنتمكن من فهم هذه العشوائية؟ هل تمتلك النيوترونات خاصية داخلية نجهلها حالياً؛ خاصية تختلف من نيوترون لآخر وتفسر الفروق الملحوظة في فترات حياتها؟ إن هذه الفكرة غير الواقعية، والمغرية قد استُبعدت لتناقضها مع نبوءات ميكانيك الكم التي تأكدت صحتها بالتجربة.

لقد جرت محاولات أخرى لتعديل ميكانيك الكم بما يضمن بقاء إحساساتنا البديهية التقليدية على حالها. ولكن لم يُكتب النجاح لأي منها. ويبدو أن من الأفضل أن نقبل بميكانيك الكم كما هو، وأن نتبنى الحقيقة الواقعية كما تبرز مباشرة من النظرية نفسها. وعندما نذكر ميكانيك الكم فإننا نعني بذلك التفسير المسمى نظرية العوالم المتعددة الذي ابتدعه (هـ. إيفيرت) الثالث عام 1957. يقول هذا الفيزيائي بأن الحدث الفيزيائي الذي يمكن أن يقع، يقع فعلياً في عالم خاص به. أي إن الواقع الفيزيائي يتركب من مجموعة عوالم تسمى أحياناً عدودة العوالم. وكل عالم من



يمكن للنيوترون أن يتفكك في أية لحظة، وإن كان التفكك في بعض اللحظات أكبر احتمالاً منه في سواها. وبموجب تفسير إيفيرت لميكانيك الكم بفكرة العوالم المتعددة فإن كل واحدة من اللحظات التي يحدث فيها التفكك تنتمي إلى عالم لا توجد فيه لحظة تفكك سواها.



إن صورة الواقع، بموجب التفسير القائم على فكرة العوالم المتعددة، تزيل صفة المفارقة عن السفر في الزمن. تخطط صفاء لأن تركب غداً آلة (عربة) السفر في الزمن كي تعود إلى اليوم الذي هي فيه. ولكنها تقرر أيضاً ألا تفعل ذلك إذا برزت هي اليوم من هذه الآلة. إنها تستطيع أن تنفذ هذه الخطة بدون مفارقة. ففي عالم من النوع B لا تبرز صفاء من الآلة اليوم، ولذلك تدخل بموجب مخططها، في الآلة غداً. ثم تخرج اليوم، ولكن في عالم من النوع A، فتلتقي نسخة من نفسها ــ نسخة لا تدخل في آلة الزمن.

هذه المجموعة يحوي نسخته النيوترونية الخاصة التي نرغب في رصد تفككها. ويتعلق بكل لحظة تفكك نيوتروني ممكن؛ عالمٌ يتفكك فيه النيوترون في تلك اللحظة. ولما كنا نرصد تفككه في لحظة معينة فإننا نحن أيضاً يجب أن نوجد في عدة نسخ، نسخة في كل عالم. ففي أحد العوالم نرى النيوترون يتفكك في الساعة 10 و30 دقيقة، وفي عالم آخر نراه يتفكك في الساعة 10 و31 دقيقة، وهكذا دواليك. فالنظرية الكمومية، كما تُطبّق في عدودة العوالم، نظرية حتمية ــ إنها تتنبأ باحتمال ذاتي لكل نتيجة رصد وذلك بتعيين النسبة التي تظهر فيها تلك النتيجة في العوالم المختلفة.

إن تفسير إيفيريت لميكانيك الكم لايزال موضع جدل بين الفيزيائيين. ويُستعمل هذا الميكانيك عادة كأداة حساب في تقدير احتمال كل مُخرج ممكن لعملية فيزيائية وذلك انطلاقاً من مُدخل هو المعلومات المتاحة عن العملية، ونحن، في معظم الأحيان، لا نحتاج إلى تفسير الرياضيات التي تصف تلك العملية. ولكن، هناك فرعان في الفيزياء ــ هما علم الكون الكمومي والنظرية الكمومية للحساب ــ يستدعيان مثل هذا التفسير. وهذان الفرعان يهدفان أساساً إلى اكتشاف كيفية عمل المنظومات الفيزيائية المدروسة داخلياً. وفي هذين المجالين يسود تفسير إيفيريت لدى الباحثين.

فماذا تقول إذاً نظرية ميكانيك الكم، من زاوية تفسير إيفيريت، بخصوص مفارقات السفر في الزمن؟ إن إحدى المفارقات وهي مفارقة الجد لم تعد مطروحة. هب أن صفاء قد اندفعت في مشروع ينطوي على مفارقة، مشروع يمنع ولادتها إذا تحقق. فماذا يحدث؟ إذا كان الزمكان التقليدي يحتوي على حلقات زمنية، فلا بد عندئذ، بموجب ميكانيك الكم، من وجود رابطة غريبة الشكل بين العوالم المحتواة في عدودة العوالم. فبدلاً من وجود عدة عوالم مستقلة ومتوازية؛ يحوي كل منها حلقات زملية، نصبح في الواقع إزاء زمكان واحد مؤلف من عدة عوالم متشابكة مترابطة. وهذه الراوابط تجبر صفاء على السفر إلى عالم يطابق العالم الذي غادرته، حتى لحظة الوصول، ولكنه يختلف بعدئذ بسبب وجودها فيه.

هل تحول صفاء دون ولادتها أم لا؟ إن الجواب يتوقف على العالم الذي نشير إليه. ففي العالم الذي غادرته، والذي ولدت فيه، يتزوج جدها جدتها فعلاً، ولكن صفاء لا تزوره فيه. أما في العالم الآخر، العالم الذي سافرت فيه صفاء الأصلية نحو الماضي، فلا يتزوج جدها هذه السيدة بالذات وبالتالي لا تولد صفاء بتاتاً.

وهكذا نرى أن سفر صفاء في الزمن يقيد أفعالها. والواقع أنه بموجب ميكانيك الكم، فلن يقيد هذا السفر الأفعال أبداً. أي إن ميكانيك الكم، يتوافق مع مبدأ الاستقلال الذاتي حتى عند وجود حلقات زمنية.

لنفترض أن صفاء تحاول جهدها أن تنفذ مفارقة، فتقرر أن تركب غداً عربة السفر في الزمن وأن تغادرها اليوم، إلا إذا برز صنوٌ لها اليوم كان قد انطلق غداً، وفي هذه الحالة لن تركب عربة الزمن غداً. إن هذا القرار ينطوي على تناقض ذاتي من وجهة نظر الفيزياء التقليدية، ولكنه ليس كذلك من وجهة نظر ميكانيك الكم. ففي نصف العوالم ــ التي نرمز لها بـــA تخرج صفاء من العربة أكبر سناً. وعندئذ، بموجب قرارها، لا تركب صفاء العربة غداً، وبالتالي فإن كل عالم من العوالم A يحتوي على صفاءين: إحداهما أكبر سناً من الأخرى بقليل. أما في العوالم الأخرى، B، فلا يخرج أحد من العربة وتركب صفاء عندئذ العربة وتصل إلى عالم من A تلتقي فيه صنواً لها أصغر سناً. وتكون من جديد حرة في التصرف على هواها في الماضي، فتفعل أشياء تختلف تماماً عما في ذاكرتها (الدقيقة).

وهكذا هناك في نصف العوالم لقاء بين صفاءين، ولا يوجد لقاء في النصف الآخر. ففي العوالم A تظهر «من العدم» صفاء أكبر سناً، وفي العوالم B تختفي «إلى الأبد». وهكذا يحتوي كل واحد من عوالم A على صفاءين إحداهما، الأكبر سناً، بدأت حياتها في B، وقد اختفت صفاء الآن من كل عوالم B، لأنها هاجرت إلى أحد عوالم A.

وهكذا نرى أن ميكانيك الكم يقضي بأن تترابط العوالم فيما بينها بطريقة تتيح لصفاء أن تنفذ مخططاتها دون تناقض، مهما بلغت هذه المخططات من التعقيد. هب أن صفاء تريد أن تُنشئ مفارقة وذلك بأن تحاول اختراق هذه الرابطة مرتين. أي إنها تريد أن تظهر ثانية في العالم الذي غادرته وأن تلقى نفسها السابقة لتتناول طبقاً من السباكيتي بدلاً من الشطيرة التي تذكر أنها تناولتها. إنها تستطيع أن تتصرف على هواها، كأن تأكل مثلاً الطبق الذي تريده بصحبة صنوها الأصغر؛ لكن عدودة العوالم، بسبب ترابطها المختلف عن ترابط المفارقة السابقة، تمنعها من فعل ذلك في عالمها الأصلي. أي إنها تستطيع أن تنجح في مشاطرة صنوها طبق السباكيتي في عالم آخر فقط، في حين أنها تظل وحيدة في عالمها الأصلي مع شطيرتها.

وثمة ظاهرة أخرى غريبة يمكن أن تتحقق بفضل السفر في الزمن، ونسميها الانفصال اللاتناظري. لنفترض أن سميراً، صديق صفاء، لا يصاحبها في هذا السفر: ففي نصف العوالم تركب صفاء عربة السفر في الزمن ولا تخرج منها أبداً. من وجهة نظر سمير توجد إمكانية انفصال أبدي. إن إحدى نسختي سمير سترى صفاء وقد غادرت دون رجعة. (النسخة الأخرى تعود إليها صفاء الثانية). أما من وجهة نظر صفاء فلا يمكن أن يحدث أي انفصال عن سمير لأن كل نسخة منها ستنتهي إلى عالم يحوي نسخة من سمير ــ نسخة عليها أن تعاشرها بنسخة أخرى من ذاتها.

ولو أن سميراً وصفاء اتبعا مخططاً واحداً ــ أن لا يدخل أحدهما في العربة إلا إذا غادرها الآخر أولاً ــ لأمكن لهما أن ينفصلا تماماً منتهيين في عالمين مختلفين. ولو أرادا تنفيذ رغبتين أكثر تعقيداً لأمكن لكل منهما أن ينتهي مصاحباً أي عدد من نسخ الآخر. ولو كان بالإمكان السفر في الزمن على مدى طويل لاستطاعت حضارتان متعاديتان في مجرة واحدة استخدام الانفصال اللاتناظري للسيطرة على المجرة كلها. وعلى هذه الشاكلة يمكن لحضارة كاملة أن تُضاعف نفسها. كما تفعل صفاء، إلى أي عدد من نسخ ذاتها. وكلما ازداد عدد هذه النسخ يتزايد احتمال أن يرى أحد الراصدين زوال هذه الحضارة من عالمه، وذلك بالضبط على شاكلة زوال صفاء من العالم A بالنسبة لسمير، عندما تظهر نسختها في العالم B (وربما كان هذا هو السبب في أننا لم نصادف قط أناساً من خارج الأرض)!

إن ميكانيك الكم، في حكاية الناقد الفني ومن وجهة نظر المشاركين فيها، يتيح وقوع حوادث على شاكلة ما يصف دوميت: إن العالم الذي تعلَّم فيه الرسام الرسم لا بد أن يكون العالم الذي أتى منه الناقد. واللوحات في هذا العالم كانت ناجمة عن جهود إبداعية، وقد نُقلت صورها فيما بعد نحو ماضي عالم آخر. وهناك حصل بالفعل انتحال اللوحات ــ إذا كان نسخ المرء نسخة أخرى عما صنعه يمكن أن يُسمى انتحالاً ــ وحصل الرسام على «شيء بالمجان». ومع ذلك لا توجد مفارقة؛ لأن وجود اللوحات ناجم عن جهد حقيقي خلاق، ولو في عالم آخر.

إن فكرة إمكانية حل مفارقات السفر في الزمن، بفضل مفهوم العوالم المتعددة، ليست جديدة على كتّاب الخيال العلمي ولا على الفلاسفة؛ بل إن ما عرضناه أقرب إلى كونه طريقة برهان على صواب هذا الحل، بالاستناد إلى نظرية فيزيائية قائمة، منه إلى حل مبتكر. وكل ما قلناه عن السفر في الزمن مستمد من استخدام ميكانيك الكم لاستنباط سلوك الدارات المنطقية ــ تماماً كالدارات المستخدمة في الحواسيب، باستثناء أننا نضيف هنا فرضية أن المعلومات يمكن أن تسافر نحو الماضي على حلقة زمنية. والمسافرون الزمنيون في حاسوبنا هنا هم رُزم من المعلومات. وقد تم الحصول على نتائج مماثلة باستخدام نماذج أخرى.

إن هذه الحسابات تؤدي إلى التخلص تماماً من مفارقات اللاتوافق التي هي مصنوعات ذهنية محضة مستمدة من وجهة نظر عالمية تقليدية انتهت صلاحيتها. لقد قدمنا الحجج لبيان أن مفارقات المعرفة أيضاً ليس من شأنها أن تقف حائلاً دون السفر في الزمن. لكن هذه الحجج ستظل موضع جدل إلى أن نتمكن من ترجمة المبادئ مثل المعرفة والإبداع إلى لغة الفيزياء؛ وعندئذ فقط نستطيع أن نؤكد ما إذا كان مبدأ «عدم وجود وجبات مجانية» الذي نتطلبه (والقائل بأن خلق المعرفة يأتي من عملية حل المسائل) متناسقاً مع ميكانيك الكم وسائر الفيزياء في حال وجود حلقات زمنية.

وهناك حجة أخيرة غالباً ما تُساق ضد السفر في الزمن. وبهذا الصدد يقول هوكنك: «إن أفضل برهان على استحالة السفر في الزمن هو أننا لم نلحظ قط وفودا من السياح قادمين من المستقبل ». لكن هذه الحجة خاطئة، لأن الحلقة الزمنية لا ترجع الزمن إلى أبعد من اللحظة التي خُلقت فيها. فلو صنعت أولى الحلقات الأرضية الزمنية المتاح سلوكها في عام 2054 فإن المسافرين في الزمن عليها بعد ذلك يستطيعون استخدامها للسفر إلى عام 2054 أو إلى ما بعده، لا إلى ما قبله. وقد توجد فعلاً حلقات زمنية متاح سلوكها في مكان آخر من المجرة إلا أنه يجب ألا نتوقع بالضرورة «وفوداً من السياح قادمين من المستقبل». فبسبب محدودية إمكانية الحلقات الزمنية، وعدم إمكان تجديد مخزوننا منها في أي وقت

معين في هذا العالم، يتضح أن الحلقة الزمنية ليست مَعيناً يمكن تجديده. لكن الحضارات الخارجية عن أرضنا، أو أحفادنا ستكون لهم أولوياتهم في مجال استخدامها. ولا يوجد سبب يحملنا على الاعتقاد بأن زيارة الأرض في القرن العشرين تقع على رأس اهتماماتهم. وحتى لو كان الأمر كذلك فلن يصلوا إلا إلى بعض العوالم، وقد لا يكون عالمنا من جملتها.

وهكذا نستنتج ما يلي: إذا كان السفر في الزمن مستحيلاً، يظل علينا أن نكتشف سبب هذه الاستحالة. وقد نستطيع، أو لا نستطيع، ذات يوم أن نكتشف أمكنة فيها حلقات زمنية صالحة للسفر، أو أن نصنع عدداً منها. لكن إذا تأكدت لنا صحة صورة من قبيل نموذج العوالم العديدة — ولا نعرف، في علم الكون الكمومي ولا في النظرية الكمومية للحساب، أي بديل قابل للتطبيق — فإن كل الاعتراضات المسوقة ضد السفر في الزمن تكون معتمدة على نماذج خاطئة للواقع الفيزيائي. وبالتالي فعلى من لايزال يرفض فكرة السفر في الزمن أن يقدم حجة علمية أو فلسفية جديدة.

المؤلفان

David Deutcsh – Michael lockwood.

أستاذان في جامعة أكسفورد يشتركان في الاهتمام بالأسس الفلسفية للفيزياء. يعمل دوتش زميلاً باحثاً في كلية ولفسون. حصل على الدكتوراه في الفيزياء من أكسفورد تحت إشراف (د. سياما) وقام بأبحاث بعد الدكتوراه تحت إشراف (ج.أ. ويلر) و(ب. دو ويت) و(ر. بنروز) ويعمل حالياً في مجال النظرية الكمومية في الحسابيات. ويؤلف دوتش الآن كتاباً في الفيزياء والفلسفة بعنوان «بنية الحقيقة». أما لوكوود فهو زميل في كلية كرين كوليج ومحاضر في قسم التعليم المستمر. حصل على الدكتوراه في الفلسفة من أكسفورد أيضاً. وأصدر كتابه «العقل والدماغ والكمومية» في عام 1989 ويؤلف حالياً كتاباً آخر حول طبيعة الزمن. يعتقد المؤلفان أن العالم الحقيقي أغرب بكثير مما يتصوره الخيال العلمي ولكنه في النهاية أكثر قابلية للفهم.

مراجع للاستزادة

CAUSAL LOOPS, Michael Dummett In The *Nature Of Time*. Edited By R. Flood And M. Lockwood. Basil Blackwell. 1986.

Do The Lawes Of Physics Permit Closed Time-Like Curves? Kip S. Thorne In *Annals Of The New York Academy Of Sciences*. Vol. 631, Pages 182-193; August 1991.

Quantum Mechanics Near Closed Timelike Lines. David Deutsch In *Physical Review* D. Vol. 44, No. 10, Pages 3197-3217; November 15, 1991.

The Paradoxes Of Time Travel. David Lewis In *American Philosophical Quarterly*, Vol. 13, No. 2, Pages 145-152; April 1976. Reprinted In *The Philosophy Of Time*. Edited By Robin Le Poidevin And Murray Mac Beath. Oxford University Press, 1993.

Must Time Machine Construction Violate The Weak Energy Condition? Amos Ori In *Physical Review Letters*, Vol. 71, No. 16, Pages 2517-2520; October 18, 1993.



الزمكان الكسوري (الفراكتلي) [1]

تُعمِّم نظرية نسبية المقياس[2] مبدأ النسبية الذي أعلن عنه آينشتاين. وبذا يصير الميكانيك الكمومي نتيجة لنظرية النسبية

(ل. نوتال)

إننا نعتبر اليوم أن ما يقابل الفيزياء التقليدية (المألوفة) المهتمة بالظواهر الكبيرة المقياس، هو الفيزياء الكمومية، التي تعالج الظواهر المجهرية. وتهدف نظرية نسبية المقياس إلى وضع حد لهذا التعارض، وذلك باستنتاج الميكانيك الكمومي من تعميم مبدأ النسبية الذي يحكم الفيزياء التقليدية. إن هذا الاتجاه يغيّر بعمق إطار تفكيرنا: فهو يسير بالتوازي مع تعميم المفاهيم والأدوات الرياضياتية المستخدمة في الفيزياء.

تعتبر نظرية النسبية العامة قمة الفيزياء التقليدية. وينص مبدأ النسبية، الذي أعلن عنه ألبرت آينشتاين، على أن قوانين الطبيعة تنطبق على جميع النظم الإحداثية Coordinates Systems مهما كانت حركتها. ومن حقنا أن نتساءل عن طبيعة هذه القوانين، التي لا يمكن للفيزيائي سوى افتراض وجودها ومن ثم محاولة مقاربتها من خلال المعادلات.

إننا نستخدم منذ عهد (إ. نيوتن) الطريقة التفاضلية Differential لوضع الظواهر الفيزيائية في معادلات: نفكك كائناً مركباً إلى أبسط أجزائه، فيتيح هذا التبسيط تقديم وصف محلي وتفاضلي يسمح، عقب المكاملة Integration، بتعرّف الخواص الشاملة لهذا الكائن.

وإذا كانت هذه الأجزاء أكثر تعقيداً أو مختلفة عن الكائن الأصلي، بدلاً من أن تكون أبسط منه، فإن الطريقة المتبعة تفقد فعاليتها. ذلك ما يحدث في فيزياء الجسيمات: عندما ننظر إلى كائن ما بمسرّع جسيمات - الذي يعوّض المجهر بالنسبة لهذه المقاييس - تظهر بنى جديدة كلما ازداد مقياس التكبير. ويقوم الميكانيك الكمومي بوصف هذا السلوك. وهكذا فإن مبدأ النسبية «العامة» لأينشتاين، الذي يعتمد على قابلية المفاضلة، غير قادر - بحكم طبيعته - على توضيح الأفعال الكمومية المبنية على عدم قابلية المفاضلة.

يُعمم مبدأ نسبية المقياس مبدأ النسبية (حسب آينشتاين) كما يلي: إن قوانين الطبيعة لا تنطبق على كل حركة فحسب، بل تنطبق أيضاً مهما كان مقياس نظام الإحداثيات المستخدم. إننا نستعيض، في نسبية المقياس، عن المقادير الفيزيائية - مثل السرعة والطول بدوال Functions تتعلق صراحة بدقة الرصد، أي بالميز[3]. وبذلك يصبح الميز متغيراً أساسياً ملازماً للزمكان (الزمان والمكان)، الذي يميز المقياس الخاص بالنظام الإحداثي المستخدم، كما تميّز السرعة حركته. إن الميز الزمكاني يمتلك النسبية نفسها التي تمتلكها الحركة: بما أنه لا يمكن تعريف مجال طولي أو زمني بصفة مطلقة، فما له معنى في هذا الصدد هو نسبة بين مقياسين.

وعندما نطبق هذه الفكرة (القائلة إن المقادير الفيزيائية تتعلق صراحة بالميز) نصل إلى المفهوم الهندسي للكسوري (فراكتل) Fractal. ففي أوائل الثمانينيات اقترحتُ و(ج. أورد) (من جامعة أونتاريو)، كل منا على حدة، اعتبار الخواص الكمومية ناتجة من الطبيعة الكسورية للزمكان المكروي (المجهري).

النسبية والنظم الإحداثية

لقد تساءل فلاسفة القرون الوسطى: لماذا خُلِقَ الكون في مكان وزمان معينين تماماً، وليس على مقربة من ذلك المكان أو بُعيد ذلك الزمان؟ إن الجواب عن هذا التساؤل موجود في مبدأ النسبية لآينشتاين: لا يوجد مَعْلَم مطلق في الكون، لا في الزمان ولا في المكان، يسمح بتحديد موقعنا.

إن تعريف نظام إحداثي (نظام إحداثيات) يتطلب أولاً تعريف مبدأ له (مبدأ الإحداثيات). ولما كانت جميع نقاط الكون متكافئة، فإن موقع مبدأ نظام إحداثي بالنسبة إلى موقع نظام إحداثي آخر هو وحده الذي يحمل معنىً فيزيائياً. والأمر كذلك فيما يتعلق بتوجيه المحـــاور : الزوايا النسبية هي وحدها التي يمكن تعريفها . إن هذه

[1] The Fractal Space - Time

[2] السلّم

[3] Resolution الميز (ج: ميوز) أو الفصل: مدى إمكان تمييز أشياء، أو أجزاء من شيء، عندما تكون صورها أو قياساتها متقاربة.

وللحصول على هذه القوانين، ليس ثمة حاجة إلى أن نضيف إلى مبدأ النسبية لكاليليو، فرضية ثبات سرعة الضوء في الفضاء كما فعل آينشتاين عام 1905: فلإيجاد الصيغة العامة لهذه القوانين يظهر ثابت c، فنعتبره مساوياً لسرعة أي جسيم معدوم الكتلة في الخلاء. وبالتالي يصبح تحويل كاليليو حالة خاصة من تحويل لورنتز، يوافق جعل الثابت c لا نهائياً. لذا فإن مبدأ النسبية يفرض تحويلات لورنتز، ويفرض بالتالي مبدأ الزمكان.

استنتاج التثاقل[4] من النسبية

إن نظرية النسبية العامة لآينشتاين، وهي النظرية الأكثر تطوراً مقارنة بنظريات النسبية الراهنة، تسمح بفهم أعمق: فلم نعد نقتصر على الحركة ذات السرعة النسبية الثابتة بل نعتبر أية حركة متسارعة. ويندرج التثاقل في إطار هذه النظرية بفضل مبدأ التكافؤ The Principle Of Equivalence. ينص هذا المبدأ، الذي وضعه آينشتاين عام 1907، على نسبية الحقل التثاقلي ذاته: كل حقل تثاقلي يكافئ محلياً Locally حقل تسارع منتظم. وهكذا أصبح وجود الحقل التثاقلي ذاته وجوداً غير مطلق، فهو مرتبط بحركة النظام الإحداثي المستخدم: ففي نظام يسقط سقوطاً حراً في هذا الحقل، ينعدم التثاقل نهائياً. وهذا ما يشعر به رواد الفضاء عند انعدام الثقالة الأرضية.

وفي حين تصف النظرية النيوتونية كيف «يعمل» التثاقل، فإن نظرية النسبية العامة تفسّر الغاية من وجود التثاقل وتعرفنا به. إن عمومية الوصف تفرض علينا الانتقال من زمكان منبسط[5] (أي إقليدي) إلى زمكان محدب، ذلك أن الحال الإقليدية وضعية خاصة توافق غياب التثاقل. وهكذا، ندرك في آخر المطاف أن التثاقل هو مجموعة العروض المختلفة للتقوس Curvature.

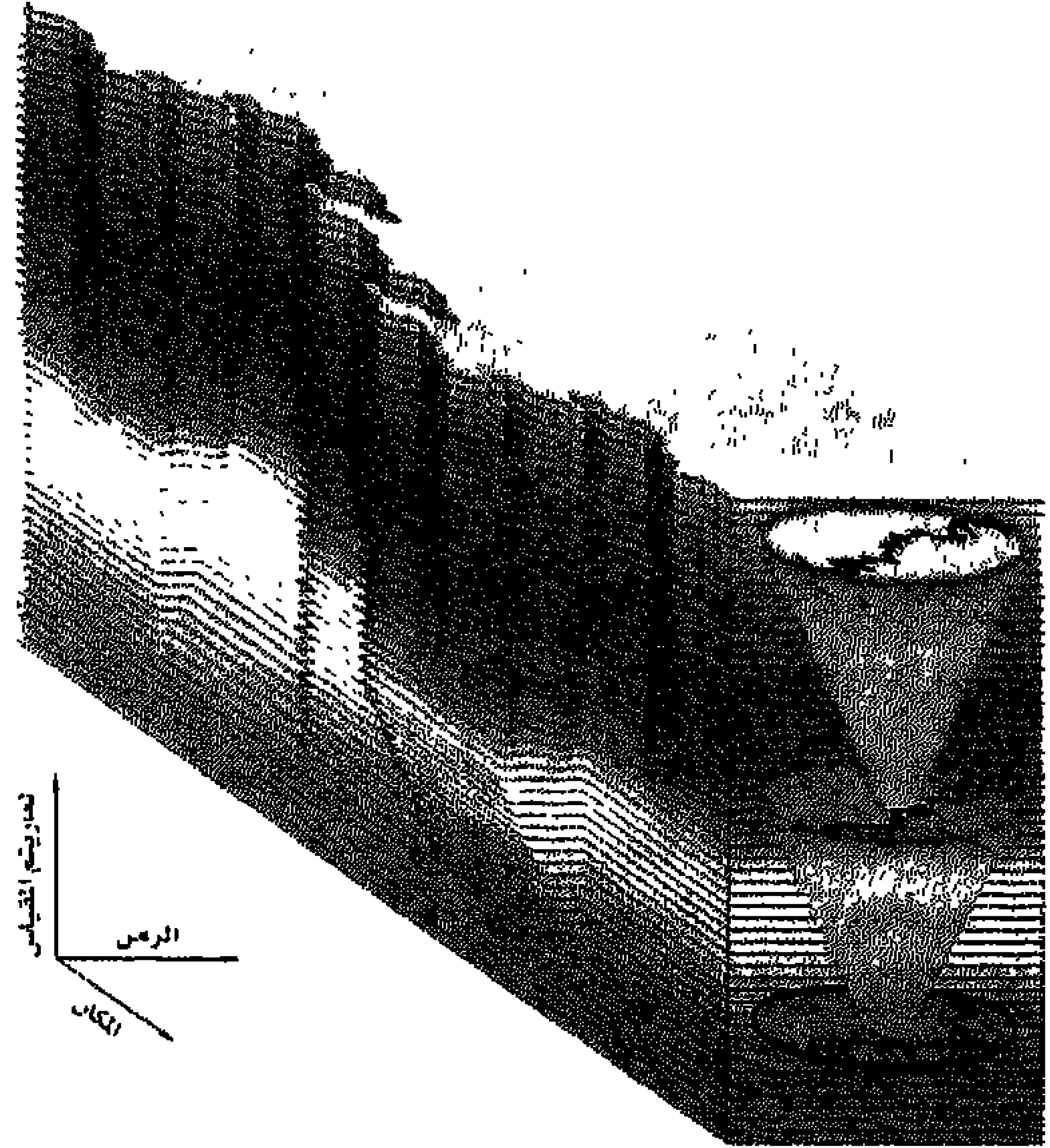
إن مسار جسيم، غير خاضع لأية قوة، هو خط مستقيم يرسمه هذا الجسيم بسرعة ثابتة. وهذا المستقيم هو أقصر خط (يسمى الجيوديزي Geodesic) لزمكان مستو. وفي النسبية العامة، تكون حركة جسيم خاضع لحقل تثاقلي معقّد تعقيداً كيفياً، حركة عطالية محلياً[6] (بسرعة ثابتة) على الجيوديزيات لزمكان محدب. إن معادلات آينشتاين التي تربط بين تحدب الزمكان وبين توزيع الطاقة والمادة هي أعم أبسط المعادلات اللامتغيرة[7] عندما نحول نظم الإحداثيات تحويلاً مستمراً (متصلاً) Continuous وقابلاً للمفاضلة مرتين: تفرض النسبية وجود التثاقل كما تفرض شكل المعادلات التي تصفه.

[4] gravitation: تثاقل؛ gravity: ثقالة (جاذبية أرضية).

[5] Flat: منبسط، Curved: محدب

[6] Locally Invertial

[7] Invariant



تُظهر التكبيرات المتوالية لمنحنٍ غير قابل للمفاضلة «أينما كان تقريباً» (أي كسوري) بنى تزداد دقة (في اليمين). وعندما نعمم مبدأ النسبية إلى زمكان غير قابل للمفاضلة، يصبح المقياس سمة لنظام الإحداثيات. لقد مثلنا هنا كيفية من كيفيات تغير منحن جيوديزي Geodesic في مثل هذا الزمكان بدلالة المقياس.

الخواص تؤدي دوراً أساسياً في الفيزياء: إنها تترجَم إلى تناظرات زمكانية وإلى لا تغيرات Invariance بالنسبة إلى الانسحابات Translations الزمانية والمكانية وكذلك بالنسبة إلى الدورانات Rotations. ومن هذه التناظرات، نستنتج اللاتغير المتعلق بكل من الطاقة والدفع (كمية الحركة) Impulsion والعزم الحركي Kinetic.

لقد برزت فكرة النسبية في الفيزياء بفضل كاليليو الذي اكتشف الطابع النسبي للحركة العطالية Inertial (أي الحركة المستقيمة المنتظمة). فالسرعة هي التي تخصص حركة نظام إحداثي، لكن فرق السرعة هو وحده الذي له معنى؛ ولا يمكن تعريف هذا الفرق إلا بالنسبة إلى شيئين اثنين (مثلاً: سرعة كرة بالنسبة إلى مستو مائل)، ولا وجود لسرعة مطلقة.

ومع (هـ. بوانكريه) ثم بوجه خاص مع آينشتاين، اتخذ مفهوم النسبية بُعداً جديداً: لأول مرة بدت الفيزياء قادرة على الإجابة ليس عن السؤال «كيف؟» فحسب، بل أيضاً عن السؤال «لماذا؟» بخصوص جملة من المسائل. وهكذا فنظرية النسبية الخاصة The Special Theory Of Relativity تمثل الحل العام لمسألة نسبية الحركة العطالية، كما كانت مطروحة في عهد كاليليو: ما هي قوانين تحويل النظم الإحداثية العطالية (الخاضعة لسرعة نسبية ثابتة، الواحد بالنسبة للآخر) التي تحقق مبدأ النسبية؟ إنها تحويلات لورنتز التي تربط الإحداثيات الأربعة (x', y', z', t') في نظام S' خاضع لسرعة v بالنسبة للإحداثيات الأربعة (x, y, z, t) في نظام S.

مسلّمات الميكانيك الكمومي

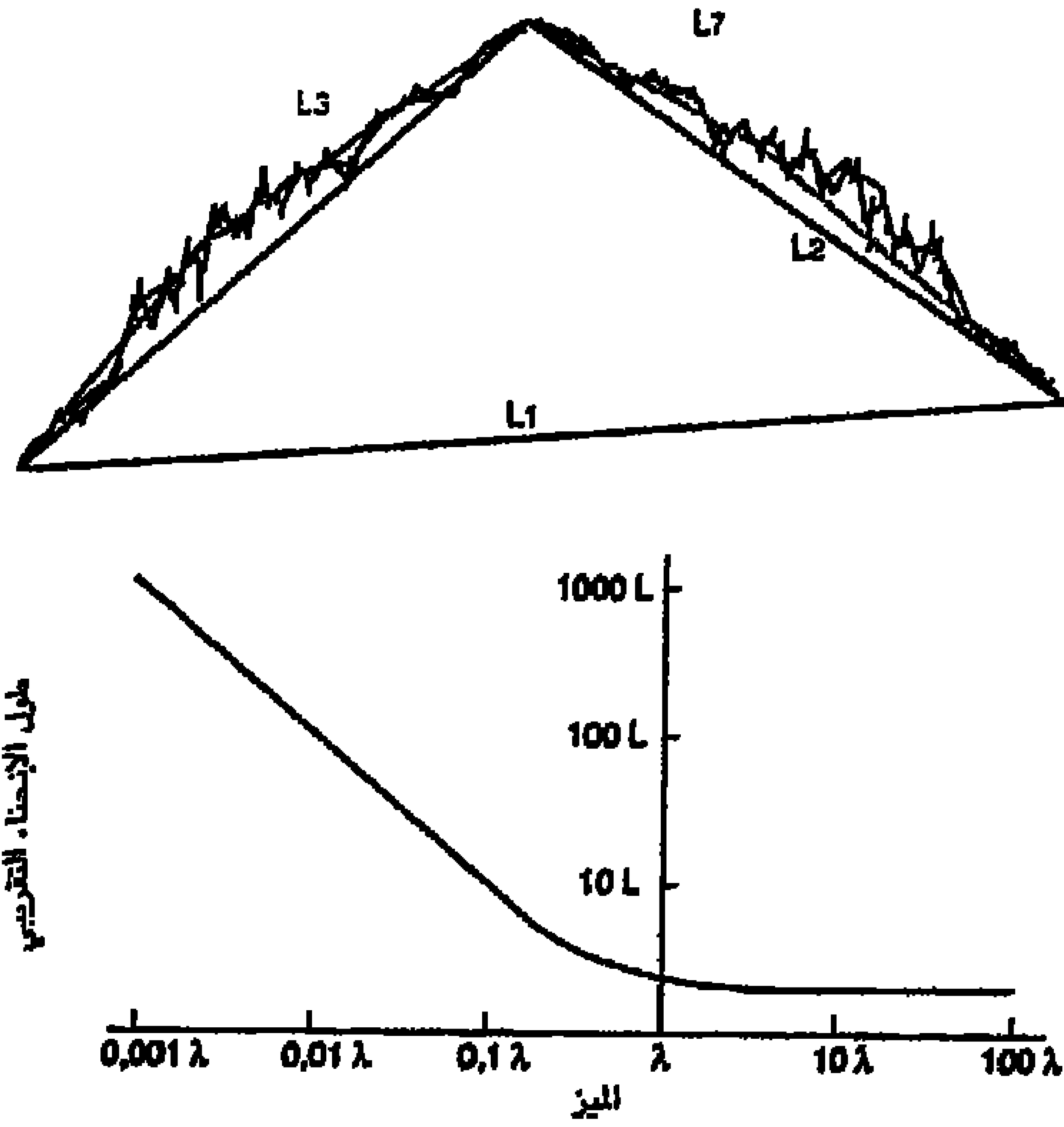
تعتمد النظرية الكمومية على مسلّمات مستنبطة من التجارب الفيزيائية المجهرية التي تعجز المفاهيم المألوفة عن توضيحها. كانت هذه النظرية في صيغتها الأولية تقوم على إزالة المفاهيم التي تبدو غير ضرورية وعلى الاقتراب أكثر ما يمكن من نتائج الرصود والمشاهدات. إننا لا نستطيع مشاهدة مسارات الجسيمات: لذا نحذف المسارات. وفي العديد من الحالات، يستحيل توقع تطوّر نظام من النظم، لكننا نستطيع حساب احتمال الحصول على هذه النتيجة أو تلك: لذا فالنظرية الكمومية نظرية احتمالية. ثم إن التجربة تفرض خاصية أساسية أخرى: هي الثنويّة موجة - جسيم[8].

تضع النظرية الكمومية العناصر الثلاثة: الاحتمال والموجة والجسيم، في كائن نظري واحد هو دالة الموجة Wave Function. لقد وضع كل من (إ. شرودينكر) و(و. هايزنبرك) معادلات تخضع لها دالة الموجة. إنه لم يُبرهن على هذه المعادلات وعلى مبدأ التوافق - الذي يربط المقادير القابلة للمشاهدة بمؤثرات تؤثر في دالة الموجة - انطلاقاً من مبدأ أولي بل وُضعت قبلياً[9].

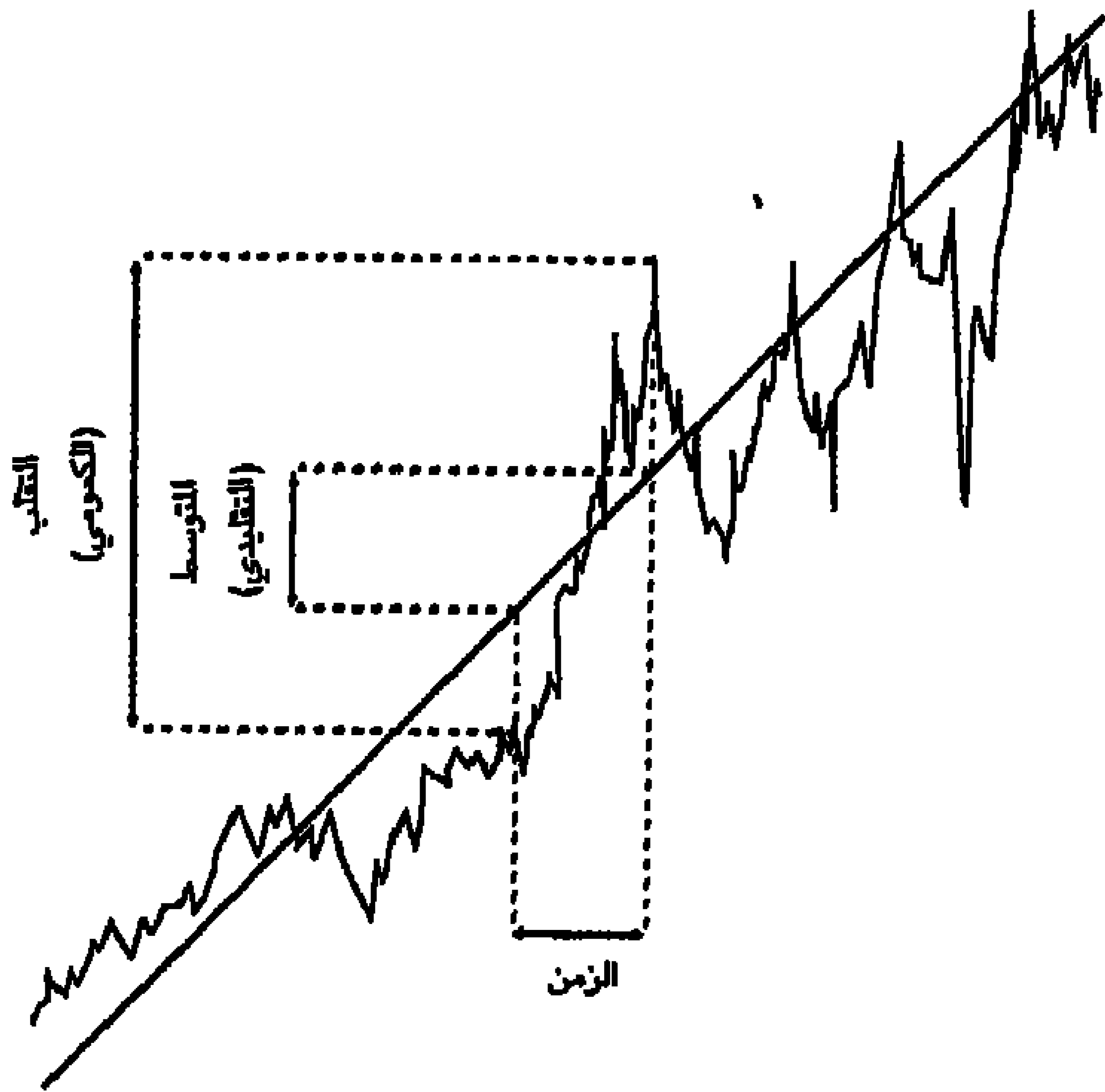
والملاحظ أن النظرية الكمومية الحالية تعتبر الزمكان منبسطاً كما هي الحال في النسبية الخاصة؛ وذلك على الرغم من أن تطور الأفكار في الفيزياء بفضل لايبنتز وماك وأخيراً آينشتاين، أدى إلى تجريد فكرة «فضاء مستقل عن محتواه» من أي مدلول فيزيائي. أليس من التناقض أن نسلّم، من جهة، بعمومية الخواص الكمومية غير التقليدية التي تتمتع بها الكائنات المجهرية؛ ثم نعتبر، من جهة أخرى، بأن الإطار الذي يحتوي على هذه الكائنات لا يتأثر بذلك؟

كان (ر. فايمن) أول من حاول، في أواخر الأربعينيات من هذا القرن، العودة جزئياً إلى فكرة التمثيل الزمكاني وذلك بإعادة الاعتبار إلى مفهوم المسارات الكمومية. وهكذا فإن فايمن اقترب من تصور للحقيقة الكمومية تصوراً أقرب إلى الهندسة[10] وذلك من دون أن يتخلى عن مبدئه القائل باللاحتمية Indeterminism. لقد وصف فايمن و(أ. هيبس) في كتابهما الذي صدر عام 1965، المسارات الافتراضية النموذجية لجسيم كمومي، كما يلي:

«إن المسارات المهمة التي يسلكها الجسيم الكمومي ليست تلك التي لها ميل معين (أو سرعة معينة) جيداً في كل مكان، بل على العكس من ذلك، فهو يسلك الطرق غير المنتظمة على جميع المستويات اللامتناهية في الصغر. وهكذا، حتى وإن تمكّنا من تعريف سرعة وسطية، فإن السرعة التربيعية quadratic الوسطية غير موجودة في أية نقطة. وبعبارة أخرى، فإن المسارات ليست قابلة للمفاضلة».



نعيد إنشاء منحن غير قابل للمفاضلة بوساطة التقريبات المتوالية (في أعلى الشكل). نرسم أولاً قطعة مستقيمة (اللون الأزرق): توجد على الأقل نقطة من المنحني تقع خارج القطعة المستقيمة، وبالتالي نستطيع رسم قطعتين مستقيمتين تلتقيان على المنحني. وفي المرحلة التالية نضاعف عدد القطع بالطريقة نفسها. وهكذا يزداد، في كل مرحلة، طول القطعة: $L_1<L_2<L_3...<L_n$. وإذا كان المنحني كسورياً (فراكتليا) ثنائي البعد تحت خطوة λ، ولا كسورياً فوق هذه الخطوة، فإن القياس L للطول لا يتعلق بالميز (الفصل) عندما يكبر المقياس. وعلى العكس من ذلك يتزايد ذلك القياس حتى اللانهاية مع الميز عندما يصغر المقياس.



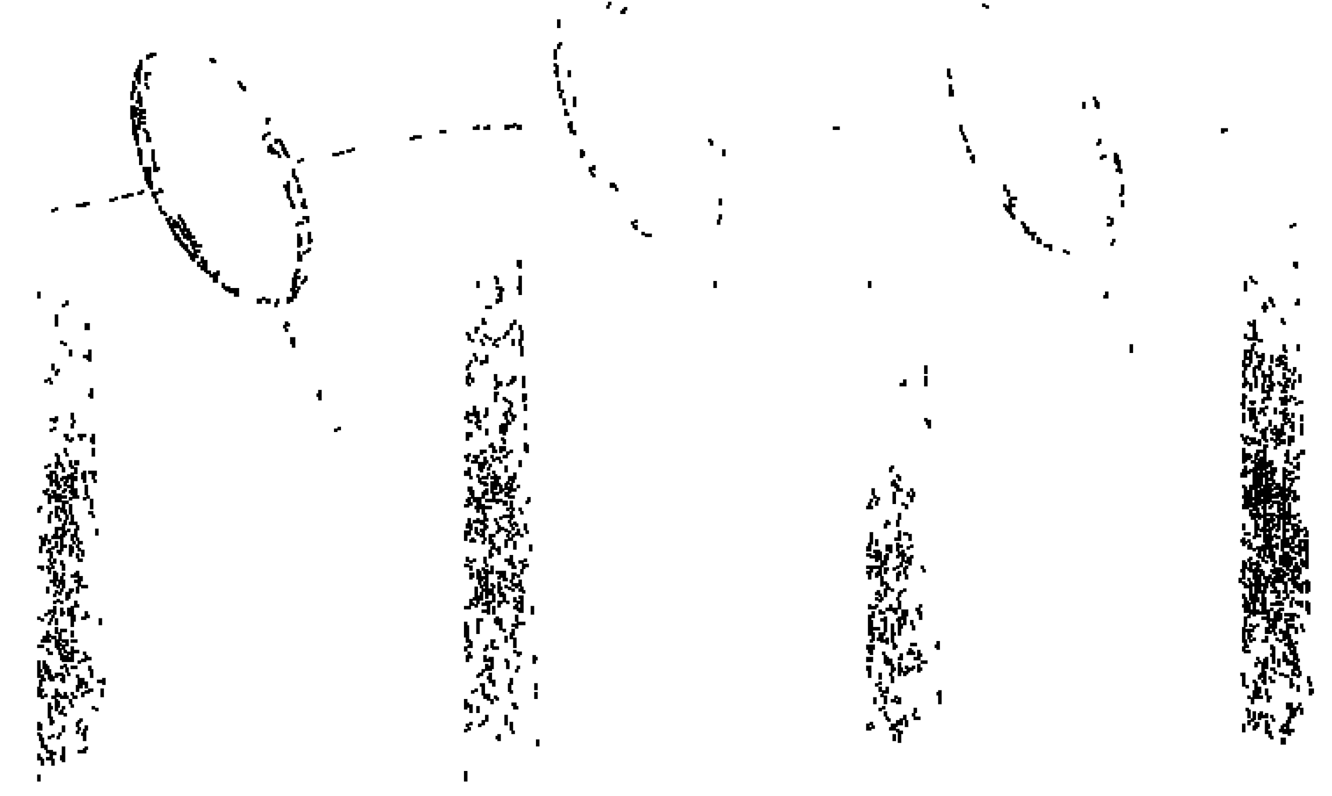
يتعلق تطور إحداثية من الإحداثيات عبر الزمن على مسار كسوري بالميز (الفصل) المستخدم. عندما يكبر المقياس (اللون الأزرق)، أي من أجل ميز منخفض، توجد سرعة متوسطة: يتناسب تغير الإحداثية مع تغير الزمن، وهو ما يقتضيه السلوك التقليدي. وعندما يتحسن الميز، فإن التقلب fluctuation بالنسبة للمتوسط يكون مهيمناً: يكون طول الظاهرة أكبر بكثير من تغيّر الزمن (اللون الأحمر). وهكذا يظهر السلوك الكمومي وتقلبات المسارات ابتداءً من ميز معين يتعلق بالنظام المعتبر. فبالنسبة للإلكترون، يكون هذا الميز العتبي هو طول موجة دي بروي de Broglie.

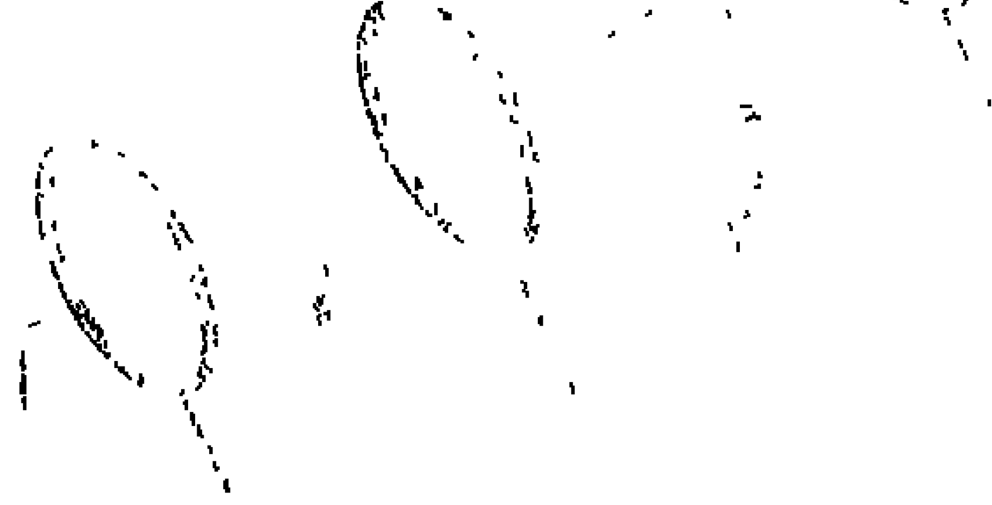
---

(8) The Duality Wave - Corpuscule

(9) á Priori

(10) Geometry





إن التحويلات الناتجة من المشاهدة أو الرصد في إطار تكبيرات متوالية ضمن نسبية المقياس، تختلف عن التحويلات المعتادة. إذا استخدمنا التكبير نفسه على جسم، عدداً كافياً من المرات، فإن سرعة تزايد كبر صورة هذا الجسم تتناقص. أما الحد الأدنى للطول الذي يمكن تحديد ميزه فهو يؤول إلى نهاية محدودة تساوي نحو 10^{-35} متر. وعندما يقترب المقياس من هذه النهاية فإن التكبيرات لا تزيد حجم الصورة. يشبه هذا السلوك تركيب السرعات بجوار سرعة الضوء التي تمثل نهاية لا يمكن اختراقها.

الزمكان غير القابل للمفاضلة

وبمصطلحات اليوم، يعني هذا الوصف للمسارات الكمومية الممكنة – على الرغم من اختلافها وعددها اللامنتهي – أن الأمر يتعلق بمنحنيات كسورية (فراكتلية) تتميّز بخاصية هندسية مشتركة: بُعدها الكسوري يساوي اثنين. إن هذا الإدخال لمفهوم «عدم قابلية المفاضلة» في مجال الفيزياء يشدّ الانتباه لاسيما أن آينشتاين كان قد ارتأى بشكل صريح، في الفترة نفسها تقريباً، أن مقاربة واقعية للمسألة الكمومية قد تمر من خلال ذلك. وقد كتب آينشتاين عام 1948 إلى (و. باولي) يقول:

«إن الوصف الكامل لا يمكن أن يقتصر على المفاهيم الأساسية المستخدمة في ميكانيك النقطة. وقد أكّدتُ لكم مراراً أني مؤيد عنيد، ليس للمعادلات التفاضلية، بل لمبدأ النسبية العامة الذي لا نستطيع الاستغناء عن قوته الاستكشافية».

وهكذا شُقّ طريق لإدراك الظواهر الكمومية. ألا ينبغي مواصلة التقدّم نحو زمكان أعمّ، ثم لعمم مبدأ النسبية إلى زمكان غير قابل للمفاضلة، كسوري؟ ومن المؤكد أن فكرة البحث عن البنى العامة لزمكان غير قابل للمفاضلة وخاضع لمبدأ النسبية، واستخلاص القوانين الفيزيائية للحركة في مثل هذا الزمكان، فكرة مغرية. وما نتوخاه من مثل هذه المقاربة هو إدراك أن «الكمومية» هي تعبير عن «عدم قابلية المفاضلة».

وعلى الرغم من ذلك تبدو هذه المسألة في غاية الصعوبة: ألا يعني التخلي عن قابلية المفاضلة تخلياً عن المعادلات التفاضلية التي تمثل أداة أساسية للفيزياء منذ مجيء لايبنتز ونيوتن؟ هناك لحسن الحظ احتمال وجود طريق آخر يؤدي، بشكل مدهش، إلى الطريق السابق مع توفير أداة رياضياتية تسمح بوصف عدم قابلية المفاضلة بوساطة المعادلات التفاضلية!

ويكمن مفتاح الحل في تفسير أعمال فاينمن بدلالة الكسوريات. لنعتبر دالة مستمرّة (متصلة) ولا تقبل المفاضلة أينما كان تقريباً ومرسومة بين نقطتين في المستوي. إننا نستطيع تجزئتها إلى مقاطع متوالية تنشئ تقريبات تزداد دقة بالتدريج (انظر الشكل العلوي في الصفحة السابقة). إن أطوال مختلف التقريبات ترتبط بوضوح بالميز (بالفصل)؛ فهذه الأطوال تتزايد، بل وتتباعد Diverge، عندما تؤول خطوة القياس إلى الصفر. ينتج ذلك من مبرهنة أثبتها (هـ.لوبيك) Lebesgue وتنص على أن: كل منحنٍ منتهي الطول يقبل المفاضلة أينما كان تقريباً[11]. وبالعكس، إذا كان منحنٍ مستمر لا يقبل المفاضلة أينما كان تقريباً، فلابد أن يكون غير منتهي الطول.

إن التخلي عن الفرضية الكيفية القائلة إن كل منحنٍ في الزمكان يقبل المفاضلة، والاحتفاظ في الوقت نفسه بفرضية استمرار هذه المنحنيات ينجم عنهما ارتباط صريح يتعلق بالميز. ولسنا بحاجة إلى إضافة فرضية تنص على أن للزمكان طبيعة كسورية على المستوى المجهري: فهذا أمر تم البرهان عليه الآن. وهكذا تكون النسبية الموسعة لتشمل الحركة غير القابلة للمفاضلة مكافئة لنسبية المقياس. وعليه فنحن لسنا بصدد القيام بتعميم كيفي خال من القيود: إننا نريد أن تحقق المعادلات المكتوبة في مثل هذا الزمكان غير القابل للمفاضلة، مبدأ التغاير Covariance، وهي العبارة الرياضياتية لمبدأ النسبية، أي إن المعادلات تحافظ على الشكل نفسه الذي تكون عليه في حالة قابلية المفاضلة.

في نسبية المقياس، تُستكمل القوانين التي تخضع لها الحركة بقوانين خاصة بالمقياس تحكم التحويلات من ميز إلى آخر: إن المقادير الفيزيائية مرتبطة أيضاً بالميز. والكيفية الأولى لاكتشاف هذه القوانين المتصلة بالمقياس تتمثل في اعتبارها أبسط القوانين الممكنة. وهكذا، نكتب معادلة تفاضلية من المرتبة الأولى على تبديل لا متناه للميز: يُعطي حل هذه المعادلة طول منحن كسوري ثابت البعد! وبذلك تكون الدوال الكسورية الثابتة الأبعاد، والمتباعدة وفقاً لقانون القوة كدالة في الميز، هي أبسط أشكال القوانين المرتبطة صراحة بالمقياس. ذلك هو بالضبط السلوك الذي حصل عليه فاينمن بخصوص المسارات الكمومية.

---

(11) Nearly Everywhere

استنتاج الفيزياء الكمومية من النسبية

نستنتج المسلّمات الرئيسية للميكانيك الكمومي من مفهوم الزمكان الكسوري. قبل كل شيء، تفرض عدم قابلية المفاضلة الطابعَ الاحتمالي للوصف. إن مسار جسيم حر في نظرية آينشتاين هو منحن جيوديزي في الزمكان. وسيكون الأمر كذلك في الزمكان الكسوري. إلا أن وجود التموّجات Fluctuation في حالات صغر المقياس يجعل عدد الجيوديزيات لا منته، مع العلم أنها كلها متساوية الاحتمال حسب التعريف: التوقع الوحيد هو أن الجسيم «سيرسم» منحنياً جيوديزياً معيناً من بين جملة لا منتهية من هذه المنحنيات.

إن هذا النص غير كامل لأن الطريقة الكسورية تحول أيضاً مفهوم الجسيم الأولي. في النظرية الكمومية الحالية، يعتبر الإلكترون – من وجهة نظر طبيعته الجسيمية – بمثابة نقطة. إنه يتمتع بخواص «داخلية» مثل السبين Spin (العزم الحركي) والكتلة والشحنة. ويرتبط السبين بتناظر في الزمكان، لكن ليس له مقابل في النظرية التقليدية. ثم إننا نجد الشحنة ومقادير كمومية أخرى توافق تناظرات داخلية ليس لها، هي الأخرى، مقابل في الزمكان. إن التخلي، في الزمكان الكسوري، عن فكرة النقطة الكتلية يجعلنا نعتبر «الجسيمات»، بطبيعتها الموجية والجسيمية بمثابة مجموعة خواص الجيوديزيات.

إن وصف الزمكان الكسوري يفرض علينا أن نأخذ بالاعتبار بنى جديدة ترتبط بالتحويلات التي تجرى على الميز. وننظر إلى هذا الميز كميز داخلي لأن البنى الكسورية تؤدي إلى صغر المقياس، وبوجه خاص إلى ما تحت طول موجة دوبروي الذي يقترن بالجسيم (هذا الطول يساوي نسبة ثابت بلانك إلى كمية حركة الجسيم). يحقق هذا الطول الانتقال بين السلوك الكسوري واللاكسوري (بين السلوك المستقل عن الميز في حالة كبر المقياس وبين السلوك المتعلق صراحة بالميز في حالة صغر المقياس). إن الأمل الذي يحدونا عقب هذه الملاحظة، هو أن تكون الخواص «الداخلية» ناتجة في آخر المطاف من التناظرات المتصلة بتحويلات المقياس، وأن تكون خواص ذات مدلول هندسي، بمفهوم «الهندسة غير القابلة للمفاضلة». وعليه فمفهوم الجسيم لن يهتم عندئذ بكائن «يمتلك» سبيناً أو كتلة أو شحنة، بل سيقتصر على البنى الهندسية للجيوديزيات الكسورية في زمكان غير قابل للمفاضلة. ومن المؤكد أن إنجاز هذا البرنامج من أوله إلى آخره أمر بعيد المنال، إلا أن بعض النتائج المشجعة تلوح في الأفق.

في البداية، نلاحظ إن طول موجة ودور Period دو بروي المقترنين بجسيم فُسّرا هندسياً بالانتقال بين السلوك الكسوري واللاكسوري: إنها المقاييس (السلالم) التي تظهر تحتها تراجعات المسارات إلى الوراء (تراجعات مكانية بالنسبة للطول وزمانية بالنسبة للدور) . ثم يمكن حساب الطاقة وكمية الحركة والسرعة



للانتقال من النقطة A إلى النقطة B مروراً بالنقطة C يمكن لجسيم أن يسلك عدداً غير منته من الجيوديزيات (المنحنيات الجيوديزية) الكسورية، جميعها متساوية الاحتمال. وضمن المقياس المعتبر، تُعرف سرعة في كل نقطة من الجيوديزي. إن متوسط هذه السرعات على الجيوديزيات التي تنطلق من النقطة A إلى النقطة B مروراً بالنقطة C، يعطي السرعة الكبرية (الماكروية) macroscopic (الأمامية عند النقطة C (السهم الأحمر الكبير)، أما متوسط السرعات، التي يتم الحصول عليها بقلب إشارة الزمن على الجيوديزيات التي تنطلق من النقطة B إلى النقطة A مروراً بالنقطة C، فيعطي السرعة الكبرية (الخلفية) في النقطة C (السهم الأسود الكبير). ولما كان الزمكان غير قابل للمفاضلة، فإن هاتين السرعتين المتوسطتين عند النقطة C مختلفتان. وهذا التضاعف الأساسي للسرعات يؤدي إلى الطبيعة العقدية لدالة الموجة.

التقليدية وسرعة الطور Phase وكتلة الجسيم كدوال في المقياس. وبذلك تصبح كل هذه المقادير خواص هندسية مميزة للمسارات الكسورية.

ونجد الأمر ذاته بالنسبة إلى السبين؛ فلا وجود للسبين في النظرية التقليدية لأننا إذا أخذنا الإلكترون مثلاً، فإن السبين سيكون متناسباً مع مربع لنصف قطر الجسيم المنعدم! لكنه يتناسب أيضاً مع سرعة الدوران التي يمكن أن تكون لا منتهية على مسار كسوري (فراكتلي).

والنتيجة اللافتة للانتباه هي أن هذا الجداء (جداء الصفر في اللانهاية) معدوم دوماً عندما يكون البعد الكسوري[12] للمسار أصغر من اثنين، وهو غير منته عندما يكون فيها البعد مساوياً لاثنين، فإن الجداء المذكور سيكون منتهياً، وربما غير معدوم. وإن البُعد اثنين هو بالضبط بُعد المسارات الكسورية المحسوبة انطلاقاً من علاقة ارتياب هايزنبرك. أما الشحنة فهي تفسَّر على أنها مقدار هندسي لا متغير ناتج من تناظرات المقياس (السلّم).

إن عدم قابلية التمييز بين الجسيمات يأتي مباشرة من تطابقها مع مسارات كسورية. ثم إنه ليس لهذه المسارات أية سمة ذاتية تسمح بالتمييز بينها. وهكذا لا يمكن اعتبار أية مجموعة مكوّنة من

---

(12) The Fractal Dimension

عدة جسيمات مطابقة لمجموعة أشياء فردية بالمفهوم التقليدي: إنه شيء جديد، شبكة منحنيات جيوديزية لها خواصها الهندسية الذاتية.

نلاحظ في حالة عدم قابلية المفاضلة، أن «الثنوية موجة - جسيم» تبتعد عن التفسير المعهود في النظرية الكمومية. ففي هذه النظرية تتطابق دالة الموجة مع «الموجة - الجسيم». وفي حالة نسبية المقياس فمن جهة نطابق «منحنيا جيوديزياً خاصاً» (لكنه كسوري في حد ذاته، وبالتاليّ فهو دالة في الميز) مع الطبيعة الجسيمية Corpuscular للجسيم التي تبيّنها لنا قياسات الموقع؛ ومن جهة أخرى، فإن حزمة الجيوديزيات الممكنة - وهي الأداة الوحيدة التي تسمح بتوقعات - تنقل الخواص التموّجية.

ألا تعتبر إعادة إدخال منحن جيوديزي خاص «يرسمه» الجسيم رجوعاً إلى مبدأ الحتمية Determinism؟ ألا يعني ذلك إعادة فتح الباب لمعاملات (بارامترات) خفية أقصتها عدة تجارب حاسمة في الميكانيك الكمومي؟ لا! لأننا نتخلى نهائياً عن قابلية المفاضلة: ليس هناك أي مقياس (مهما بلغ صغره) يمكن وفقه العثور على خواص تقليدية تحمل معاملات خفية. إنه من المستحيل توقع المنحني الجيوديزي الذي سيرسمه الجسيم.

الحقيقة وقابلية البرهان

وبالعكس، فما الذي يسمح لنا بالتسليم بوجود مثل ذلك المنحني الجيوديزي الخاص؟ ولقد بدا أن وجهة نظر (ن. بور) وهايزنبرك، التي تأسست على استحالة توقع مسار خاص من أجل أن نستنتج من ذلك عدم وجود هذا المسار، هي الإجابة المنطقية الوحيدة عن هذا السؤال قبل عام 1931، وهو تاريخ إثبات مبرهنة كودل Gödel. لكن الأمر لم يعد كذلك منذ ذلك التاريخ.

تنص هذه المبرهنة على أنه، في كل جملة مسلّمات غير متناقضة تحوي نظرية الأعداد، توجد قضايا صحيحة لكنها لا تقبل البرهان. إن الفيزياء علم يعتمد على الرياضيات إلى حدّ كبير ويمكن تلخيص نظرياته، بعد تكوينها، في جملة من المسلّمات الرياضياتية. ثم إن هذه المسلمات تحتوي دائماً بشكل ضمني على نظرية الأعداد، ذلك ما يتبيّن بجلاء من نتائج القياسات. إذاً، ما هو التوقع في الفيزياء؟ أليس التوقع في نظرية ما هو «مبرهنة» تتكون من مسلّمات هذه النظرية؟ تعلّمنا مبرهنة كودل أننا سنلتقي ذات يوم بنصوص فيزيائية غير قابلة للبت. ورأيي أن هذا اليوم قد حان وأن الميكانيك الكمومي يحتوي على مثل تلك النصوص.

وفي تجربة شقّي يونك Young، حيث نُكوِّن تداخلاً Interference بجعل حزمة جسيمات تخترق شاشة مزودة بشقين، فإن استحالة توقع الشقّ الذي يخترقه الجسيم في حال وجود تداخلات وتخريب التداخلات من قبل كل قياس للمواقع، أدت إلى استخلاص أن البحث عن مسار الجسيمات لا معنى له. وحسب مبرهنة كودل، فإن من الممكن أن يمر جسيم عبر شق من الشقين - وهو ما تؤكده كل قياسات الموقع الصريحة - لكن، يستحيل في الوقت ذاته، توقُّع أي الشقين سيخترقه الجسيم: لذا وجب التمييز بين الوجود وقابلية البرهان!

التقلبات الكمومية واللاتغيّر[13] في المقياس

تشكل المسارات الممكنة لجسيم مجموعة لا منتهية من المنحنيات الكسورية (يزداد عددها كلما زاد الميز). إن وصف أحد هذه المنحنيات يتطلب إدخال إحداثيات متوسطة وكبرية[14] تتطابق مع المقياس التقليدي في حال وجوده وإدراج تقلبات تتعلق بالمقياس وتهيمن على الإزاحات المتوسطة عندما يكون المقياس صغيراً جداً. وتنتج الآثار الكمومية من هذه التقلبات. وهكذا يتضح أن السلوكيات التقليدية والكمومية قضية مقياس (سلّم). وإن الطابع النسبي للانتقال، المتعلق بالكتلة والسرعة، وبوجه عام، بدرجة الحرارة، يفسر وجود آثار كمومية كبرية مثل التوصيل الفائق Supraconduction.

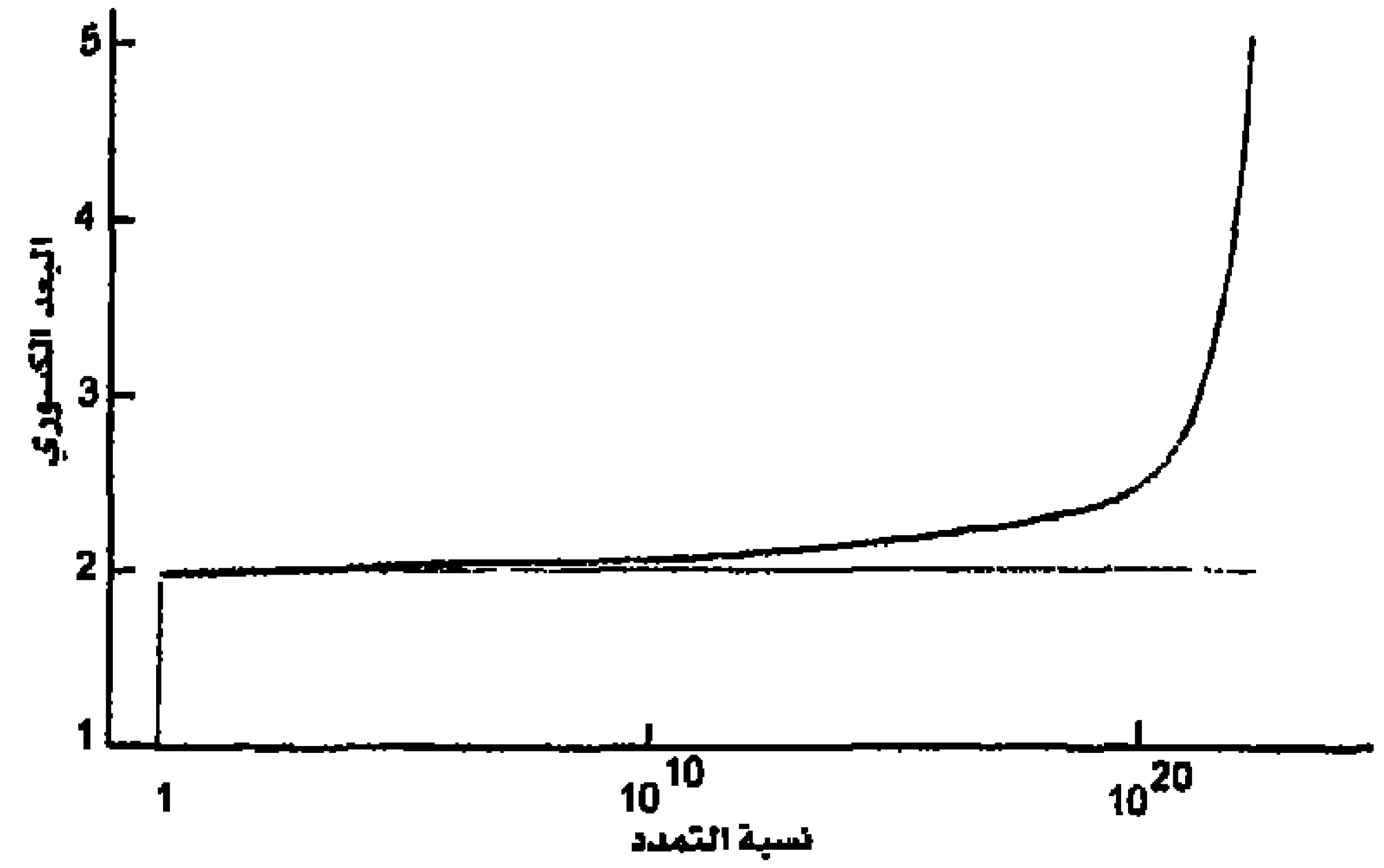
والملاحظ أن انقسام المتغيرات بين المقاربة التقليدية والمقاربة الكمومية لا يفسر كل شيء. ذلك أن الطابع العقدي Complexe لدالة الموجة، الذي تعزّزه جل مفارقات الميكانيك الكمومي صار الآن قابلاً للشرح والتأويل: سببه انكسار في اللاتغير بالنسبة للانعكاس الزمني. وهذا الانكسار ناتج بدوره، بصفة مباشرة، من عدم قابلية الزمكان للمفاضلة كما سنرى ذلك لاحقاً. إنها المرة الأولى في تاريخ الفيزياء التي تفقد فيها المعادلات لا تغيّرها عند قلب إشارة الزمن. إن السرعة المشتقة من الموقع، هي أول متغير معني بهذا السلوك الجديد.

لكي يصل منحن جيوديزي كسوري إلى نقطة معينة في لحظة معينة، هناك عدد لا منته من الجيوديزيات الصادرة التي نستطيع اعتباراً منها حساب سرعة متوسطة «أمامية» [انظر الشكل ص699] وبصورة أساسية فإن هذه السيرورة لا عكوسة: إذا سرنا في الاتجاه المعاكس للزمن على الجيوديزي الذي «يختاره» الجسيم، فإننا سنلتقي بعدد لا منتهٍ من الجيوديزيات «الداخلة» في النقطة نفسها. نحسب سرعة متوسطة «خلفية» لهذه السيرورة المعكوسة، فنلاحظ أنه لا يوجد أي مبرر يجعل هذه السرعة مطابقة للسرعة «الأمامية»، وذلك بسبب عدم قابلية الزمكان للمفاضلة. وعلى مستوى وصف الإزاحات الأولية المعتبرة، فإن الاتجاهين المتعاكسين للزمن مقبولان لوصف القوانين الفيزيائية. وهكذا، يؤدي بنا هذا الوضع إلى دمج هاتين الكميتين في سرعة عقدية لتعريف سيرورة مضاعفة جديدة عكوسة. ويمثل نصف مجموع السرعتين الأمامية والخلفية الجزء الحقيقي للسرعة، أما نصف فرق هاتين السرعتين فيمثل جزأها التخيلي Imaginary Part.

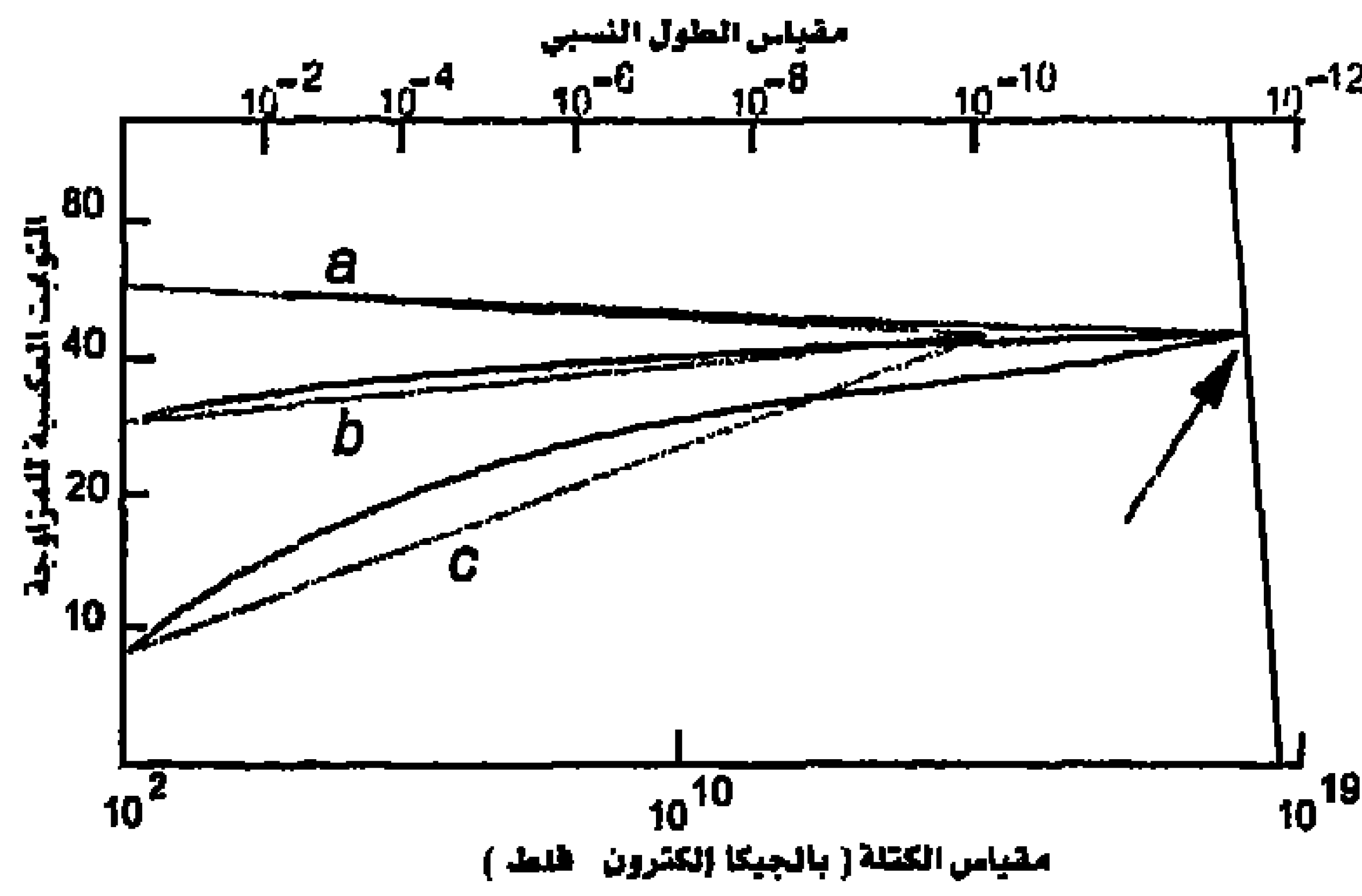
---

(13) Invariance

(14) Macroscopic ماكروية



يؤدي البعد الكسوري لمسار جسيم الدور نفسه، إزاء تحويلات المقياس، الذي يؤديه الزمن في تحويلات الحركة. إن هذا البعد يساوي واحداً في التحويلات الخطية فوق المقياس λ عند الانتقال بين السلوك الكسوري (الفراكتلي) واللاكسوري، ويساوي اثنين تحت هذا المقياس. أما في التحويلات غير الخطية فالبعد الكسوري يتزايد باستمرار في حالة صغر المقياس (عندما تزداد نسبة التمدد). إننا لا نستطيع بلوغ مقياس بلانك (اللون الوردي): لأن البعد الكسوري سيكون عندئذ غير منته.



إن ثوابت المزاوجة coupling العكسية في التأثيرات المتبادلة interaction للكهرباء الضعيفة (a و b) والقوية (c) والتثاقل (d) تتناسب عكسياً مع شدة هذه التأثيرات. وتتغيّر بتغير المقياس. وفي الحالة النموذجية المتداولة (اللون الأخضر) يتم التوحيد في مرحلتين. وإذا ما أضفنا إلى ذلك نسبية المقياس (اللون الأحمر) فإن مقياس الطول النسبي (في أعلى الشكل) لا يكون متناسباً عكسياً مع مقياس الطاقة ــ الكتلة (في أسفل الشكل). وهكذا تتقارب التأثيرات المتبادلة الأربعة في آن واحد، ضمن طاقة بلانك، نحو 10^{18} جيكاإلكترون ــ فلط (السهم الأحمر).

وبصفة أعم، ننشئ مؤثراً جديداً خاصاً بالاشتقاق العقدي، وذلك انطلاقاً من المشتقات المتوسطة «الأمامية» و«الخلفية» التي تنجز تغاير Covariance المقياس. وعندئذ يمكن إعادة النظر في الخطوط العريضة للميكانيك التقليدي وتعميمها إلى حالة عدم قابلية المفاضلة وذلك بالاستعانة بهذه الأداة التي تجعل جميع الكميات، التي كانت من قبل كميات حقيقية، كميات عقدية. ومن بين هذه الكميات نجد، بوجه خاص، أهم مقدار في الميكانيك التقليدي، وهو ما يسمى بالفعل Action (الذي له بُعد Dimension العزم الحركي) لأن مجموعة قوانينه تنتج من «مبدأ الفعل المستقر» Stationary والذي ينص على أن المسارات الفيزيائية هي تلك التي تُبطل مفعول تغير الفعل. وعليه، فمن الطبيعي أن يندرج «الفعل» العقدي - الذي يمكن أن نبني عليه «مبدأ الفعل المستقر» المعمم - ضمن هذا الإطار الجديد: إنه بالذات دالة الموجة!

وبمقدورنا أن نحسب مؤثر الاشتقاق العقدي بالنسبة للزمن حساباً صريحاً انطلاقاً من وصف المسارات باعتبارها منحنيات كسورية ثنائية البعد. وثنائية البعد هذه هي قيمة خاصة «يختفي» من أجلها كل ارتباط صريح بدلالة المقياس، وراء صيغ المؤثرات التفاضلية المستخدمة في الميكانيك الكمومي. ويمكن البرهان على «مبدأ المقابلة»[15] الخاص بالنبض[16] والطاقة، الذي يرفق بهما في الميكانيك الكمومي، بعض المؤثرات التفاضلية - كما أن المعادلة الأساسية في الديناميك تتحول إلى معادلة شرودينكر. وبعبارة أخرى، فإن معادلة شرودينكر تُكتَب، بصورة تغايرية[17]، كمعادلة الجيوديزيات من أجل الحركة العطالية في الخلاء. وعندما نكتب هذه المعادلة بشكل صريح، فإن السلوك الكمومي يعكس خاصية عدم قابلية المفاضلة وكسورية الزمكان.

ما وراء الميكانيك الكمومي

تسمح مفاهيم نسبية المقياس والزمكان الكسوري بالمضي قُدُماً في تجديد فهمنا للميكانيك الكمومي. لقد أتاحت لنا طريقة تغاير المقياس إعادة اكتشاف الميكانيك الكمومي انطلاقاً من أبسط قوانين المقياس التي يمكن صياغتها. هل تمثل «أبسط القوانين» هذه أفضل ما يقنّن الطبيعة؟ ما هي القوانين العامة التي تتلاءم مع مبدأ نسبية المقياس، حتى وإن اقتصر هذا التلاؤم على تحويلات المقياس الخطية؟

للإجابة عن مثل هذه الأسئلة، يجب أن ننسى معارفنا حول قوانين التمدد Dilatation والتقلّص Contraction وإعادة طرحها دون خلفيات. إن أبسط قوانين المقياس الممكنة هي دالة كسورية ذات بُعد ثابت: يؤدي البعد الكسوري دور لا تغير المقياس. ولقد رأينا أن هذا القانون يسمح بأن نجد ثانية الميكانيك الكمومي النموذجي من أجل بُعد كسوري يساوي اثنين. وإن البحث عن صيغة تغايرية أعم، يقودنا إلى معالجة حالة يفقد فيها البُعد الكسوري لا تغيّره حيث يصبح، هو الآخر، مرتبطاً بالمقياس.

وفي هذا الإطار الموسّع، تصبح المسألة ممثّلة في إيجاد الأشكال الممكنة لهذا المتغير الجديد المتعلق بالمقياس، التي تتلاءم مع مبدأ النسبية: إذا كانت حالة القانون الثابت البعد، المؤدي إلى الميكانيك الكمومي المعروف، هي الحالة الوحيدة التي تحقق هذا

---

(15) The Correspondance Principle

(16) Impulsion

(17) Covariant

المبدأ، فإنه ينبغي أن يكون ذلك قابلاً للبرهان. أما إذا وجدنا إمكانيات أخرى، فإنها ستقدّم تعميماً للميكانيك الكمومي. ويدور السؤال هنا حول معرفة كيفية تحوّل الطول المنحني المعرف على منحن كسوري وتحول «البعد الكسوري» المعمم الذي يميّزه وذلك عندما يتغيّر الميز.

وكما هي الحال في نسبية الحركة فصعوبة المسألة العامة تسوقنا إلى الاكتفاء في المرحلة الأولى بمعالجتها في حالة التحويلات الخطية. إن الحل الخاص لهذه المسألة الموافق للسلوك الكسوري الثابت البعد هو زمرة Group تحويلات كاليليو. ويمكن إثبات إنّ هذه المسألة تماثل، في موضوع المقاييس، مسألة العطالة في حالة قوانين الحركة: إن حلها العام ليس زمرة تحويلات كاليليو بل زمرة تحويلات لورنتز التي استخدمها (هـ. بوانكريه) وآينشتاين لوضع قوانين النسبية الخاصة.

لم يعد التمديد يمدّد[18]

وبخصوص قوانين الحركة، فإنه لا يمكن تحقيق حل كاليليو في الطبيعة إلا بفرض أن سرعة الضوء لا نهائية. والأمر كذلك فيما يخص المقاييس: إن قوانين التمدد والتقلص التي تعتبر حالياً قوانين ثابتة لا يمكن دحضها، هي في الواقع مجرّد تقريبات على نطاق واسع لقوانين أعم. في مثل هذه القوانين يأخذ البعد الكسوري معنىً جديداً يجعل منه متغيراً أساسياً يؤدي في موضوع المقاييس الدور نفسه الذي يؤديه الزمن في الحركة. ويندمج هذا المتغير مع الإحداثيات الكسورية ليشكل متجهاً (شعاعاً) Vector في فضاء خماسي الأبعاد. ويتعين علينا أن ندرك جيداً بأن الحل العام لمسألة تحويلات المقياس الخطية التي تحقق مبدأ نسبية المقياس، هو تحويل لورنتز. والأمر لم يعد يتمثل الآن في تبرير هذا التحويل الجديد بل صار يكمن في معرفة ما إذا كان لا يتماشى مع التجربة ومحاولة فهم سبب «اختيار» حل خاص بدلاً من الحل العام.

تتميز القوانين الجديدة بعدة خواص جديدة بالنسبة لقوانين المقياس المعتادة التي يمكن مقارنتها بخواص تكافئها سبقت معرفتها في نسبية الحركة. تتمثل الخاصة الرئيسية، من بين هذه الخواص، في ظهور مقياس طول لا يمكن تجاوزه نحو أصغر المقاييس، وهذا المقياس لا متغير بالتمددات والتقلصات. ويؤدي هذا المقياس بالنسبة للميوز[19] الدور نفسه الذي تؤديه سرعة الضوء بالنسبة للسرعات الأخرى؛ وهو يعوض نقطة الصفر التي فقدت معناها في الفيزياء. وهذا لا يمثل حاجزاً ولا تكميماً[20] للزمكان: إن طبيعة هذا المقياس الحدّي هي على الأصح طبيعة أفق. إنها لا تمس مبدأ عدم قابلية مفاضلة الزمكان الذي انطلقنا منه، ولا الوجود غير المنقطع للبنى أثناء التكبيرات المتتالية: ما يتغير هو تأثير التكبيرات. إننا لن نتجاوز أبداً سرعة الضوء عندما نجمع عدداً لا منته من السرعات، وبالمثل فإن تعاقب عدد كبير من التقلصات المتوالية، المطبقة على مقياس أولي كيفي، يؤدي إلى مقياس نسبي يفوق دوماً الطول الحدّي الممثل للنهاية.

ما قيمة هذا الطول الحدي؟ هل ينبغي إدخال طول أساسي جديد في قوانين الفيزياء أو هل قدمت الفيزياء مثل هذا المقياس الذي لم يبق إلا أن نفسّره كذلك؟ يبدو أن طول بلانك، الذي أنشئ انطلاقاً من الثوابت الأساسية الثلاثة في الفيزياء – وهي ثابت الثقالة G وثابت بلانك h وسرعة الضوء C – يتمتع بكافة الخواص المطلوبة التي تجعله يؤدي دور الطول الحدي السابق الذكر. وقيمة هذا الطول هي 10^{-35} (1.6) متر. ثم إننا ننشئ انطلاقاً من الثوابت نفسها كتلة وزمن بلانك.

لقد تم استعمال طول بلانك في الفيزياء كحاجز طبيعي: فهو يمثل الحد الذي تكون بعده أهمية آثار التثاقل تعادل أهمية الآثار الكمومية. إن الملتحم Continuum الزمكاني ذاته ينكسر خلال المحاولات البالغة الصعوبة الساعية إلى وضع نظرية للتثاقل الكمومي، قادرة على وصف الظواهر الفيزيائية التي تمتلك مثل تلك الطاقات. ومازالت هذه المسألة مطروحة في مجال نسبية المقياس لكنها لا تُطرح كالمعتاد.

يتعلق التغير الأول الذي يطرأ عندئذ، بالعلاقة بين مقياس الكتلة والطاقة والدفع من جهة، وبين مقياس الطول والزمن من جهة أخرى. إن هذين المقياسين متعاكسان في النظرية الكمومية. وكلّما عبّرنا عن نتيجة بطول أو بمتجه أو بوسيط ذي تأثير مميز، فإن الذي نقيسه بشكل صريح هو طاقة ودفع يُترجَمان من جديد إلى مقياس طول بافتراض صحة العلاقات الكمومية المعتادة. ويتبين من علاقات الارتياب أن الطاقة تؤول إلى اللانهاية عندما يؤول مجال الزمن إلى الصفر، كما أن الدفع يؤول إلى اللانهاية عند مآل مجال الطول إلى الصفر. وفي قوانين نسبية المقياس لا يمكن أن يكون المجال (الزمني والطولي) أصغر من مقياس بلانك. وكما أن سرعة الضوء تؤدي في النظرية النسبية الدور المخوّل للسرعة اللامنتهية في قوانين كاليليو فإن مقياس الطول والزمن لبلانك يمتلك الآن الخواص الفيزيائية التي كانت تمتلكها الأطوال والأزمنة المنعدمة.

إن لتغيير بهذا العمق العديد من الانعكاسات الفيزيائية التي ينبغي دراستها الواحدة تلو الأخرى. وأولى النتائج المحصل عليها في هذه النظرية ليست أقلّها غرابة. لم يعد مقياسا الكتلة والطول متعاكسين بصفة مباشرة: أصبح طول بلانك توافقه الآن طاقة غير منتهية. ما هو، إذاً، مقياس الطول الموافق حالياً لمقياس طاقة بلانك؟ إننا نجده مقياساً كونياً أصغر، ألف بليون مرة، من مقياس

---

[18] La Dilatation ne Dilate Plus

[19] ج: ميز (فصل) Resolution

[20] Quantification

البوزونات bosons الناقلة للتأثير الكهربائي الضعيف المتبادل. إن هذا المقياس هو بالتحديد مقياس التوحيد الكبير[21] المكتشف في فيزياء الجسيمات. وتعني هذه النتيجة بمفهوم الطاقة، أن توحيد التأثيرات المتبادلة الأساسية الثلاثة (الكهرمغنطيسية والنووية الضعيفة والنووية القوية) يحدث في هذا الإطار الجديد عند مستوى طاقة بلانك. ولما كان هذا المقياس هو بالضبط الإطار الذي يصبح فيه التثاقل من نفس مرتبة القوى الأخرى، فلابد أن يتم توحيد التأثيرات المتبادلة الأربعة في آن معاً.

وإذا كانت هذه النتيجة مُرضية أكثر من التوحيد الذي يتم في النظرية الحالية على مرحلتين، فهذا لا يسهل حل مسألة وضع نظرية موحّدة. وعلى الرغم من ذلك فإن لهذه النتيجة الفضل في وضع حد لأحد التساؤلات الأساسية في الفيزياء: ما السبب الذي جعل ثابت التثاقل يأخذ قيمته الراهنة؟ إننا نستطيع أن نخصص له قيمة أخرى بالرجوع إلى العبارة الكمومية لتلك القوة حيث نلاحظ أن الوحدة unit الطبيعية للكتل هي كتلة بلانك: لِمَ تختلف كتل الجسيمات الأولية أكثر عن كتلة بلانك؟ الجواب هو أنه ... لا اختلاف بين تلك الكتل! يُمكن بالفعل اعتبار جسيمات الطبيعة الأساسية أكثر بمثابة الجسيمات التي تنقل التأثير المتبادل الموحّد كلية: ستكون كتل قسم كبير من الجسيمات مساوية لكتلة بلانك، وبذلك ستتحقق فيزيائياً هذه الوحدة الشاملة للكتلة.

المؤلف

Laurent Nottale

فيزيائي يعمل في مرصد مودون Meudon التابع للمركز الوطني الفرنسي للبحوث العلمية CNRS.

مراجع للاستزادة

L. Abbott et M. Wise, Dimension of a quantum-mechanical path, in American Journal of Physics, vol. 49, p. 37, 1981.

G. ORD, Fractal space- time: a geometric analogue of relativistic quantum mechanics, in Journal of Pyhsics. A: Mathematical and general, vol. 16, p. 1689, 1983.

L. NOTTALE et J. SCHNEIDER, Fractals and Non Standard Analysis, in Journal of Mathematical Physics, vol. 25, p.1296, 1984.

E. NAGEL, J. NEWMAN, K. GÖDEL et JY. GIRARD, Le théorème de GÖDEL, Seuil.1989.

R. FEYNMAN, Lumière et matière, Seuil, 1992.

L. NOTTALE, Fractal Space- Time and Microphsics: Towards a Théry of Scale Relativity, World Scientific, 1993.

A. EINSTEIN, Relativités I, éditions du CNRS/ Seuil, 1993.

A. EINSTEIN, Relativités II, éditions du CNRS/ Seuil, 1993.

L. NOTTALE, L'Univers et la lumière, Flammarion, 1994.

L. NOTTALE, Scale- Relativity, Fractal Space- Time and Quantum Mechanics, in Quantum Mechanics, Diffusion and chaotic fractals, sous la direction de M. El Naschie, O. Rössler et I. Prigogine, Pergamon Press, 1995.

L. NOTTALE, Scale Relativity: From quantum Mechanics to Caotic Dynamics, in Chaos, Solitons and Fractals, vol. 6, p. 401, 1995.

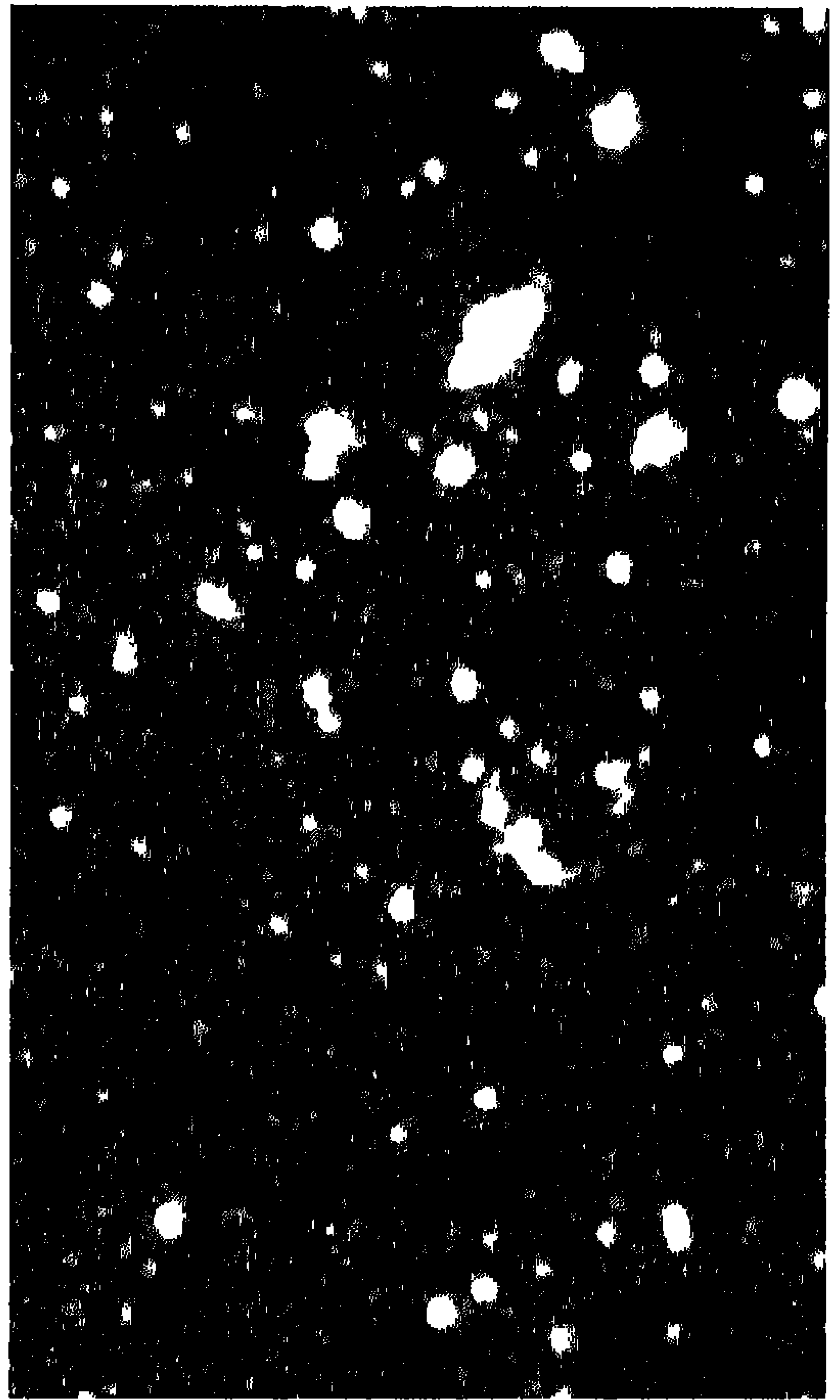


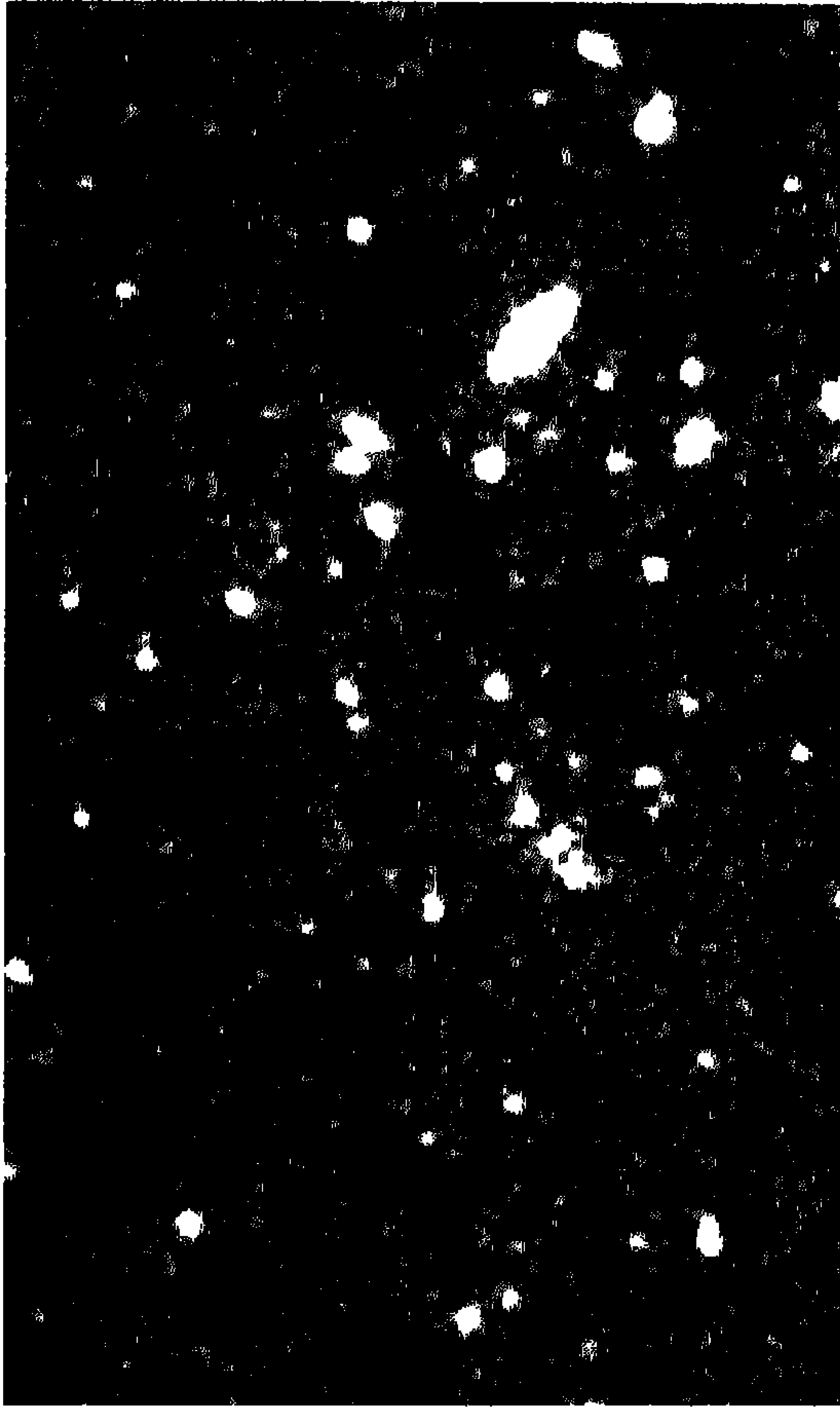
(21) the grand unification

مسح الزمكان بالمستعرات الأعظمية

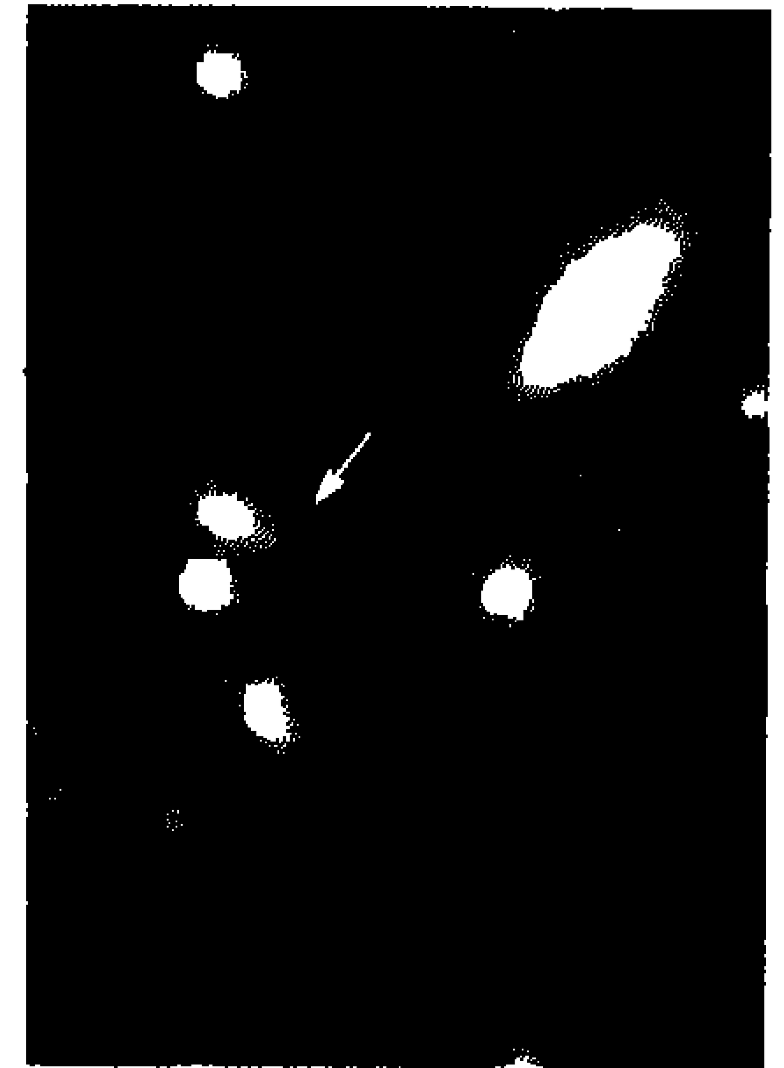
إن النجوم المتفجرة التي تُرى عبر مسافات شاسعة تبين أن التمدد الكوني ربما كان متسارعاً، وهذه علاقة تدل على أن الكون قد يكون مدفوعاً إلى التمدد بفعل شكل جديد غريب من أشكال الطاقة.

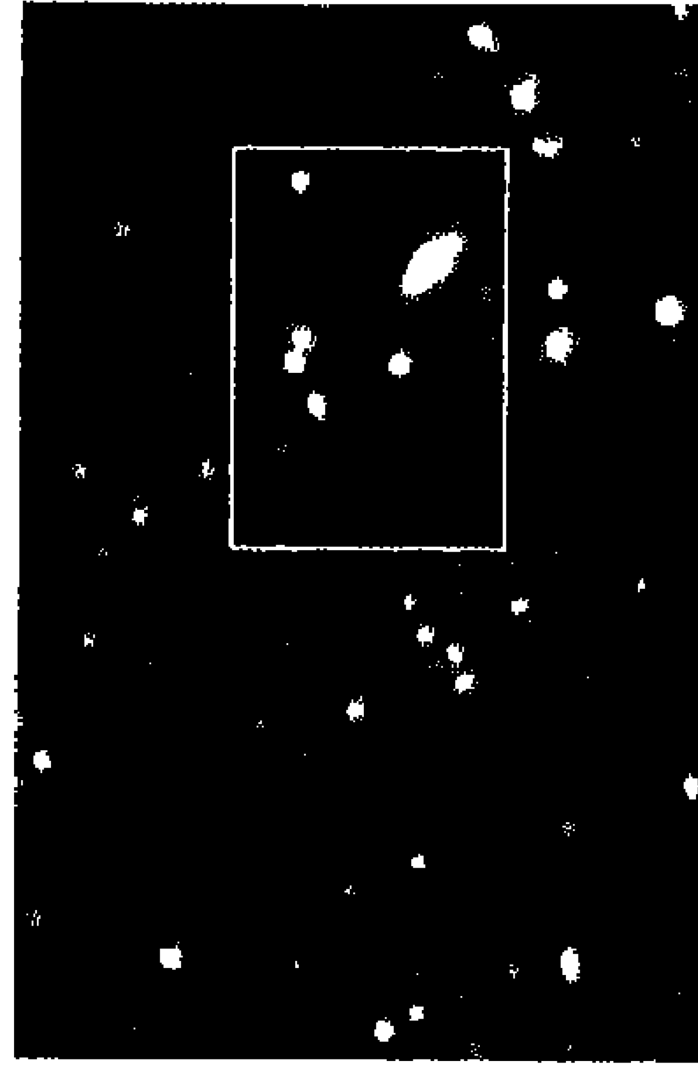
(س.ج. هوكان) — (ر.ب. كيرشنر) — (ن.ب. سنتزيف)





أين يقع المستعر الأعظم؟ إن هذا الزوج من الصور الذي حصل عليه فريق مؤلفي هذه المقالة باستعمال مقراب بلانكو (الذي قطره أربعة أمتار والموجود في مرصد سيرو تولولو الأمريكي في تشيلي)، قدّم أول دليل على وجود مستعر أعظم. في الصورة اليسرى، والتي حصلنا عليها بعد ثلاثة أسابيع من حصولنا على الصورة اليمنى، يمكن رؤية المستعر الأعظم يغيّر (بقدر لا يكاد يُدرك) مظهر إحدى المجرات. هل يمكنك العثور عليها؟ ويعود حدوث بعض الفروق إلى الظروف الجوية المتقلبة. وكي تتوثق من صحة إجابتك، انظر الصفحة التالية.





يظهر قرب السهم مستعر أعظم بعيد، انزياحه الأحمر z = 0.66 ويؤثر انفجار هذا النجم في بضعة عناصر من الصورة التي أخذت بعد حدوثه.

قبل زمن طويل (يقدر بنحو خمسة بلايين سنة)، وفي مجرة قصيّة (يفصلنا عنها نحو 2000 ميكابارسيك[1])، انفجر نجم ميت منذ أمد بعيد، مصدراً وميضاً أسطع من ضوء بليون شمس. وقد انتشر ضوؤه عبر الفضاء منقبضاً ومنبسطاً مع الكون المتمدد، وذلك قبل أن يدرك بعضُه الأرض. وخلال 10 دقائق، في إحدى الليالي المظلمة من عام 1997، حطّ بضع مئات من الفوتونات التي انطلقت من هذا المستعر الأعظم supernova على مرآة مقراب telescope في جمهورية تشيلي. وعندئذ ولّد حاسوب في المرصد صورة رقمية بيّنت وصول صورة ضوئية ضعيفة على شاشته. ومع أن النظر إلى هذه البقعة الباهتة لم يكن شيئاً مثيراً للإعجاب، فقد كان منظرها بالنسبة إلينا في منتهى الإثارة ــ إذ إنها مثلت منارة جديدة نهتدي بها لمسح الزمكان[2] space - time .

هذا وكنا، بالتعاون مع زملائنا في جميع أنحاء العالم، نترصّد وصول ضوء من عدة دستات من مثل هذا المستعر الأعظم، واستعملنا هذه الأرصاد لرسم الشكل الإجمالي للكون وتحديد التسلسل الزمني لأوقات تمدده. وماكتشفناه حديثاً، مع فريق آخر من الفلكيين، يتعارض مع المعتقد السائد طوال عقود، إذ يبدو أن الكون أكبر وأكثر خواء ممّا كان يظن. وزيادة على ذلك، فإن تمدده المتواصل لا يتباطأ كما كان يتوقع العديد من الكوسمولوجيين، بل قد يكون هذا التمدد متسارعاً.

اللغات النجمية

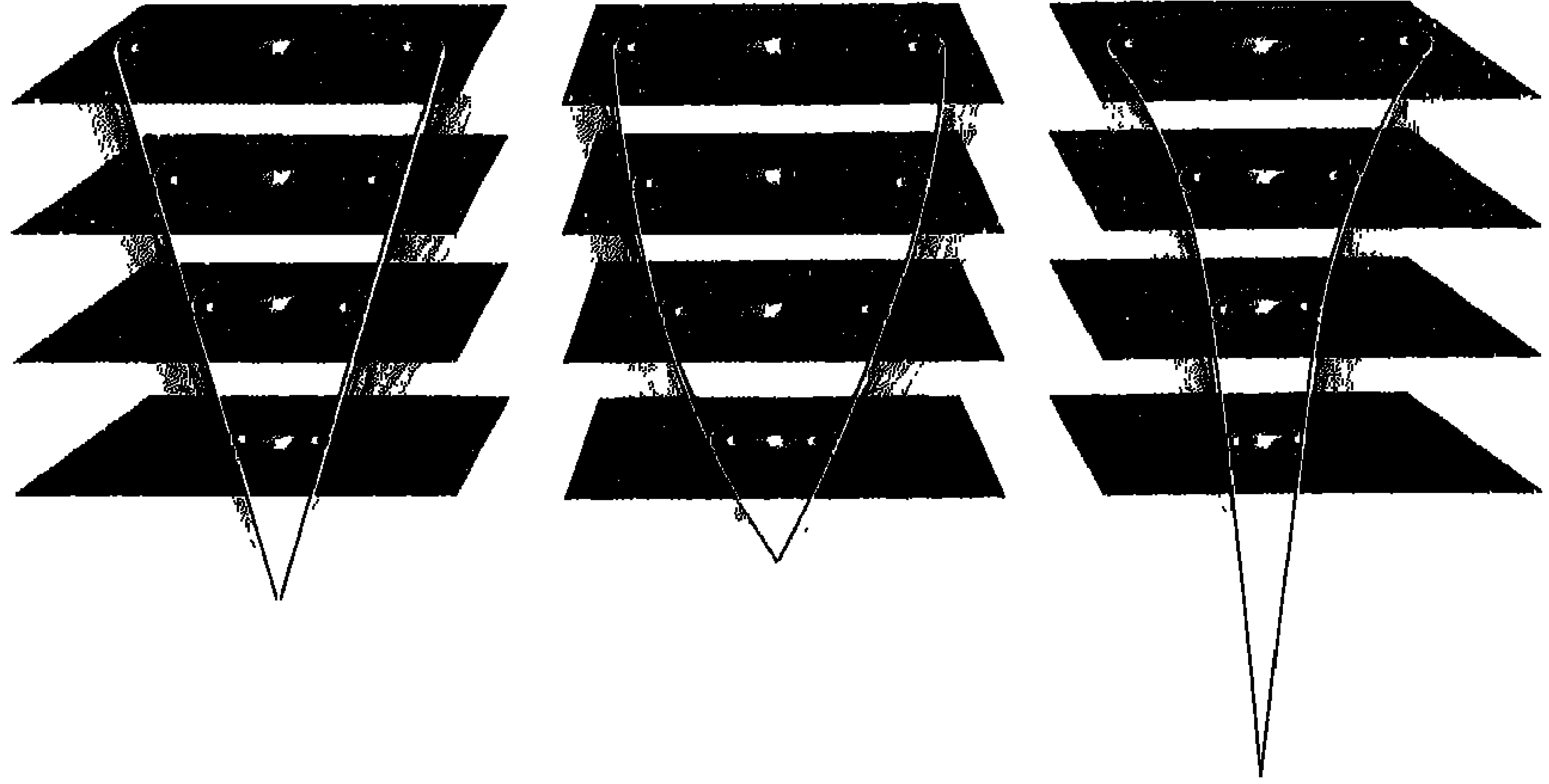
لقد كان تاريخ التمدد الكوني، ومازال، موضوعاً يحظى باهتمام شديد طوال معظم هذا القرن، لأنه يعكس كلاً من هندسة الكون وطبيعة مكوّناته، وهي المادة والضوء وربما أشكال أخرى من الطاقة. وتربط نظرية النسبية العامة لأينشتاين بين هاتين الخاصتين الأساسيتين للكون، وتفسر كيفية تأثيرهما في حركة المادة وانتشار الضوء، مقدّمة تنبؤات لأشياء محددة يمكن للفلكيين قياسُها فعلاً.

وقبل نشر نظرية آينشتاين عام 1916 والأرصاد الأولى للتمدد الكوني التي أجريت خلال العقد التالي، كان معظم الفلكيين يظنون أن الكون بقي طوال وجوده محافظاً على الحجم نفسه. وجدير بالذكر أنه حتى آينشتاين نفسه لم يثق بمعادلاته حين أدرك أنها تقتضي أن يكون الكون ديناميا. لكن قياسات جديدة للحركات المجرية أجراها [أ. ب. هَبل) وآخرون لم تدع مجالاً للشك في أن المجرات الباهتة النائية كانت تندفع بعيداً عن الأرض بسرعات أعلى من سرعات المجرات الساطعة القريبة، وهذا ينسجم مع تنبؤات نظرية النسبية العامة التي تفيد بأن الكون يتوسع ويدفع المجرات بعيداً عنا. وقد تمكّن هؤلاء الباحثون من تحديد سرعات المجرات المتجهة نحو الخارج انطلاقاً من انزياح الخطوط الطيفية المرئية إلى أطوال موجية أكبر (تسمى انزياحات حمراء Redshifts). ومع أن الانزياح الأحمر الكوسمولوجي يُعزى غالباً إلى مفعول (تأثير) دوبلر ــ وهو الظاهرة المسؤولة عن تغير طبقة الصوت pitch لصفارة قطار عابر أو بوق سيارة مارة ــ فإنه يُفسَّر تفسيراً أصح بأنه يحدث نتيجة للتمدد المستمر للكون الذي يَمُطّ الطول الموجي للضوء المار بين المجرات. وبما أن إصدارات الأجسام البعيدة، تسير مدة أطول فلها انزياح أحمر أكبر من الانزياح الأحمر للإشعاع الصادر عن الأجسام القريبة.

إن التقانة التي كانت سائدة في أيام هَبل قَصَرت سبر التمدد الكوني على المجرات التي كانت قريبة منا نسبياً. وخلال الوقت الذي استغرقه الضوء للوصول من هذه المجرات القريبة إلى الأرض، لم يتمدد الكون إلا بنسبة صغيرة من حجمه الكلي. وفيما يتعلق بهذه التغيرات الطفيفة، فإن الانزياح الأحمر يتناسب طرداً مع المسافة وتُسمى النسبة الثابتة لهما ثابت هَبل Hubble's Constant، وهو يمثّل المعدل الحالي للتمدد الكوني . لكن الفلكيين

(1) megaparsec أو ميكافرسخ فلكي = $10^6 \times 3.08572 \times 10^{13}$ كم؛ حيث إن الفرسخ الفلكي يساوي 3.258 سنة ضوئية أو 308572×10^8 كم.

(2) نحت من زمان ــ مكان.



يمكن نظرياً للتمدد الكوني أن يحدث وفق واحد من ثلاثة أنماط بسيطة: فقد يكون ثابتاً (في اليسار)، أو متباطئاً (في الوسط)، أو متسارعاً (في اليمين). وفي كل من هذه الحالات يتضخم جزء معين من الكون مع مرور الزمن (من الأسفل إلى الأعلى). لكن عمر الكون (وهو الزمن الذي انقضى منذ بداية التمدد) أكبر في حال كون متسارع وأصغر في حال كون متباطئ، وذلك مقارنة بعمره في حال التمدد الثابت.

توقعوا طويلاً ألا تخضع المجرات البعيدة لهذه العلاقة البسيطة بين الانزياح الأحمر والمسافة، إمّا لأن سرعة التمدد تغيرت مع الزمن وإما لأن الفضاء ملفوف Warped، ومن ثم فإن قياس هذا الأثر يمثل هدفاً مهماً للكوسمولوجيين ـــ لكنه هدف صعب؛ لأنه يتطلب الوسائل الملائمة لتحديد المسافات الهائلة التي تفصلنا عن المجرات البعيدة جداً.

لقد قدّر هَبل ورواد آخرون المسافات إلى المجرات المختلفة بافتراضهم أن لها جميعاً سطوعاً ذاتياً intrinsic brightness واحداً. ويقتضي منطقهم أن المجرات التي تبدو ساطعة قريبةٌ منا نسبياً، وأن تلك التي تبدو معتمةً بعيدةٌ. بيد أن هذا الأمر لا يصح إلا تقريبياً، ويردّ ذلك إلى أن المجرات تختلف في خاصياتها. وإنه لمن الخطأ تماماً الزعم بأن ضوء المنابع النائية، الذي يستغرق وقتاً طويلاً ليبلغ الأرض، يُظهر المجرات البعيدة كما كانت منذ بلايين السنين (أي في حداثتها)؛ لأن سطوعها الذاتي ربما كان مختلفاً تماماً عن السطوع الذاتي للمجرات الأنضج القريبة منا. ومن الصعب استبعاد هذه التغيرات التطورية عن آثار التمدد، لذا بحث الفلكيون طويلاً عن «شمعات قياسية» standard candles لها سطوع ذاتي معروف على وجه أفضل.

وكي تكون هذه المنارات مرئية على بُعد بلايين من السنين الضوئية، لابد من أن تكون ساطعة جداً. وخلال أوائل السبعينيات جرّب بعض الذين يقومون بمسح الكون استعمال الكوزارات، وهي منابع ذات طاقات هائلة (وربما كانت مزودة بالطاقة من الثقوب السوداء التي تبتلع النجوم والغازات). لكن تبين أن الكوزارات التي درسوها أكثر تنوعاً من المجرات، ومن ثم لم يكن لها فائدة تذكر.

وفي الوقت نفسه تقريباً، بدأ فلكيون آخرون يفكرون في الاستعانة بالمستعرات الأعظمية ـــ وهي نجوم متفجرة ـــ كشموع قياسية للدراسات الكوسمولوجية. وقد كانت هذه الطريقة موضع جدل بين الفلكيين؛ لأن المستعرات الأعظمية أيضاً تبدي اختلافات واسعة في خاصياتها. بيد أن البحوث التي أجراها في العقد الماضي أعضاء فريقنا مكّنت العلماء من تحديد السطوع الذاتي لنوع من المستعرات الأعظمية ـــ من النمط Ia ـــ تحديداً دقيقاً تماماً.

نجم الموت:

لكن ما هو المستعر الأعظم من النمط Ia ؟ إنه، جوهرياً، الانفجار الذي يحدث حين يصبح نجم ميت قنبلةً نووية حرارية طبيعية. ولا يقل إثارة عن هذا التحول الأخير تاريخُ النجم الميت الذي يبدأ حياته نجماً عادياً، أي كرة مستقرة مكونة من غاز معرّض للحرارة الناجمة عن التفاعلات النووية المستقرة التي تَجري في قلبه، والتي تحوّل الهيدروجين إلى هيليوم وكربون وأكسجين ونيون وعناصر أخرى. وعندما يموت النجم، يلتحم الرماد النووي مكوّناً جمرة متوهجة تضغط بفعل الثقالة لتصبح جسماً بحجم الأرض، كثافته أكبر من كثافة المادة العادية ملايين المرات.

إن معظم هذه النجوم التي هي من نوع الأقزام البيض white dwarf تبرد وتذوي، ثم تموت وهي تئن. بيد أنه إذا كان أحدها يدور في فلكه قريباً من نجم فإنه يقضم مادة من رفيقه القريب ليصبح أكثف فأكثف، إلى أن تندلع فيه عواصف نارية نووية حرارية شديدة. وتقوم هذه الجائحة النووية بنفخ هذا النجم القزم، كما تجعله يقذف مادة بسرعة 000 10 كيلو متر في الثانية تقريباً. ويستغرق توهج هذه الكرة النارية المتمددة زهاء ثلاثة أسابيع لتبلغ سطوعها الأعظم، ثم يخبو هذا السطوع خلال أشهر.

وتختلف المستعرات الأعظمية قليلاً في تألقها، بيد أن الانفجارات الأقوى والأسطع تدوم مدة أطول إلى حد ما، من الانفجارات الأضعف والأبهت. ومن ثمّ فإن مراقبة المدة التي تحدث خلالها هذه الانفجارات مكّنت الفلكيين من تحديد هذه الاختلافات واستنتاج السطوع الذاتي للمستعمرات بنسبة 12 في المئة. هذا وإن الدراسات التي أجريت على المستعرات الأعظمية القريبة من النمط Ia باستخدام المحَسّات الحديثة جعلت هذه الومضات أفضل شمعات قياسية معروفة للفلكيين.

وتضيء إحدى هذه الشمعات مكاناً ما من مجرة نموذجية مرة كل 300 سنة تقريباً. ومع أن مثل هذه الانفجارات النجمية في مجرتنا هي أحداث سماوية نادرة، فإنك إذا راقبت بضعة آلاف من المجرات الأخرى، فيمكنك التوقع بأن مستعراً أعظم، واحداً فقط تقريباً، سيظهر كل شهر. وفي الحقيقة، ثمة عدد كبير من المجرات في الكون التي لو أخذنا قسماً منها في رقعة من السماء، لرأينا أن المستعرات الأعظمية، التي يسمح سطوعها بدراستها، تنفجر كل بضع ثوان. وما يتعين على الفلكيين عمله هو العثور عليها ودراستها بدقة. وفي السنوات القليلة الماضية، قامت بهذا العمل مجموعتنا البحثية التي أُطلق عليها اسم "High - Z Team" (نسبة إلى الحرف الذي يستخدمه الفلكيون لتعيين انزياح أحمر)، وفريق منها كان يعمل باستقلال نسبياً منذ عام 1995 بإشراف (ب.ب. شميت) من مرصدي ماونت ستروملو Mount Stromlo وسايدينك سبرينك Siding Spring في أستراليا ومجموعة منافسة تسمى مشروع كوسمولوجيا المستعرات الأعظمية، بدأت عملها عام 1988، ويرأسها (س. بيرلمتر) من مختبرات لورنس بركلي الوطني.

ومع أن للفريقين برنامجين مستقلين، فإنهما يستفيدان من هذا التطور الأساسي، وهو نشر محسات ضوء إلكترونية كبيرة على مقاريب ضخمة، ومن شأن هذه المجموعة من الأجهزة توليد صور رقمية للأجسام الخافتة النور المنتشرة على رقع كبيرة من السماء. ومن الأمثلة الرئيسية على هذه الأجهزة الجديدة (التي استعملها كلا الفريقين) آلة التصوير الشاملة الضخمة Big Throughput Camera التي ابتكرها (ج.م. بيرنشتاين) [من جامعة ميتشيكان] و (ج.أ. تايسون) [من شركة Lucent Technologies]. فعند وضع آلة التصوير هذه في محرق مقراب بلانكو، الذي قطره أربعة أمتار والمقام في مرصد سيرُو تولولو الأمريكي في تشيلي، فإن بإمكان تعريض exposure واحد أن يغطي مساحة تماثل تقريباً مساحة القمر حين يكون بدراً، ويولّد هذا التعريض خلال عشر دقائق صورة لنحو 5000 مجرة.

وعملية العثور على مستعر أعظم بعيد ليست إلا أخذ صور للرقعة نفسها من السماء بعد انقضاء بضعة أسابيع والبحث عن تغيرات فيها قد تكون نجوماً متفجرة. ولمّا كان بمقدور محسات الضوء الرقمية أن تحصي عدد الفوتونات في كل عنصر من الصورة، فباستطاعتنا، ببساطة، طرح الصورة الأولى من الثانية والبحث عن الفروق المهمة المغايرة للصفر. وبسبب قيامنا بفحص آلاف من المجرات في كل زوج من الصور، فبإمكاننا أن نكون واثقين من أن البحث في هذه الأزواج العديدة سيتمخض عن العثور على عدة مستعرات أعظمية ـــ مادام الطقس جيداً. ولحسن الحظ، فإن موقع المرصد، على سفوح جبال الأنديز في الحافة الجنوبية من صحراء أتاكاما في تشيلي (وهي واحدة من أشد المناطق جفافاً في العالم)، يمتعنا عادة بسماوات صافية. وبعد أن أجرينا رهاناً على التوصل إلى بعض الاكتشافات الجيدة، وضعنا برنامجاً محدد المواعيد لإجراء أرصاد مسبقة تقوم بها سلسلة من المقاريب الأخرى في جميع أنحاء العالم، وذلك لنتمكن من متابعة القياسات قبل اختفاء المستعرات الأعظمية.

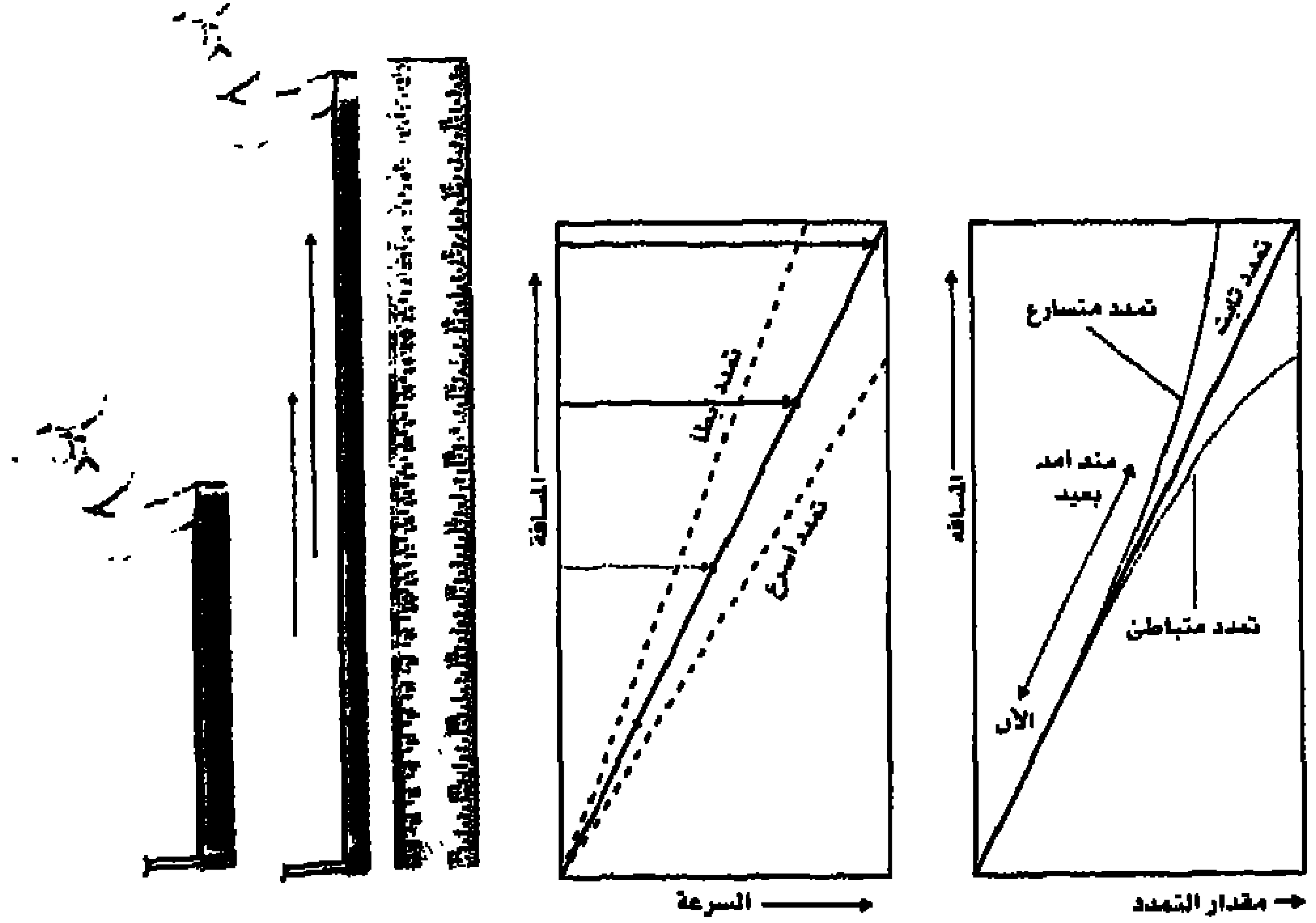
وما يحدث فعلاً هو أن البحث عن نجوم متفجرة في السماوات يرافقه انطلاق نشاط على الأرض؛ لأنه يتحتم علينا الحصول على مئات من الصور الرقمية الواسعة ومقارنة بعضها ببعض بسرعة كبيرة. ومن أجل ذلك نجنّد حواسيب موزعة في أرجاء مرصد سيرو تولولو لمهمات تنظيم الصور، ومراعاة الفروق في شفافية الجو وحجم الصور، وطرح المسحَيْن. وإذا ما سارت الأمور على مايرام، فإن معظم المجرات ستختفي تاركة اختلافات طفيفة بين الصورتين. وتشير الاختلافات الأكبر إلى وجود جسم ما جديد أو متغير، كأن يكون نجماً متغيراً أو كوازاراً أو كويكباً ـــ وفي حالات نادرة، مجرة.

وتسجّل برمجياتنا Software مواقع الأجسام الجديدة وتحاول تحديد ما هو بالفعل مستعر أعظم. لكن الاختبارات المؤتمتة تكون عادة غير كاملة، ولابد لنا من إنعام النظر في الصور بالعين المجردة لنقرر كون مستعر أعظم متعارف حقيقياً أو لا. وبسبب اضطرارنا إلى القيام مباشرة بمتابعة مكتشفاتنا بالاستعانة بمقاريب أخرى، فإن التحليل يجب أن ينفَّذ بسرعة. وفي تلك الأوقات المضنية، يتحول المرصد إلى مكان مرهق للفلكيين والطلبة الزائرين، الذين يعملون بكل حماس ليل نهار طوال أيام.

بعد ذلك نستهدف أفضل المستعرات الأعظمية التي رشحناها باستعمال أضخم الآلات الضوئية في العالم، وهي مقاريب كيك Keck التي أقيمت حديثاً في هاواي. وتقرر هذه الأرصاد الحاسمة إن كانت هذه الأشياء المكتشفة هي حقاً مستعرات أعظمية من النمط Ia، كما تعاير سطوعها الذاتي بدقة أكبر، وتحدد انزياحاتها الحمراء.

على الجانب المظلم

وثمة آخرون في مجموعتنا، يشتغلون على مقاريب في أستراليا وتشيلي والولايات المتحدة، ويقومون بمتابعة المستعرات الأعظمية لمعرفة كيف يصل تألقها إلى ذروته ثم يذوي ببطء. إن الحملة الرصدية للعثور على مستعر أعظم واحد تستغرق شهوراً، كما أن التحليل الأخير يتطلب غالباً عاماً أو أكثر، وعندئذ يكون ضوء النجم المنفجر قد اختفى، وهكذا نحصل على صورة جيدة للمجرة المضيفة. ونستعمل هذا المنظر الأخير لطرح التوهج الثابت للمجرة من صور المستعر الأعظم. ونحصل على أفضل قياساتنا من مقراب هَبل الفضائي الذي ينتزع بعض التفاصيل الدقيقة التي تميز النجم المنفجر عن المجرة التي تستضيفه.



تظهر تجربة الشريط المطاطي العلاقة الخطية بين سرعة التقهقر والمسافة. وتُعرض هنا لقطتان فوتوكرافيتان لشريط مطاطي سُحب نحو الأعلى بسرعة معينة. إن سرعة النقاط المختلفة المعلّمة على الشريط تعطى بطول الأسهم الملونة. وعلى سبيل المثال، فإن أقرب نقطة من المبدأ تتحرك بأقل قدر ممكن خلال المدة الواقعة بين لقطتين، ومن ثم فإن سرعتها هي الأصغر (السهم الأصفر)، وفي المقابل، تتحرك أبعد نقطة بأكبر قدر ممكن، لذا فإن سرعتها هي الأكبر (السهم البنفسجي). وميل المستقيم الحاصل هو معدل التمدد (البيان الأيسر). وإذا تغير المعدل بمرور الزمن، فإن الميل أيضاً سيتغير (البيان الأيمن). وتتجه الأزمان المبكرة في الرسم نحو أعلى اليمين، ذلك أن الضوء الصادر عن الأجسام الأبعد يستغرق زمناً أطول لبلوغ الأرض، وهي نقطة الأصل في الرسم. ولو كان المعدل أبطأ في الماضي - الأمر الذي يعني أن التمدد كان متسارعاً - لتقعّر الخط نحو الأعلى (الخط الأحمر). وإذا كان المعدل أسرع - كما هي الحال في تمدد متباطئ - فإن الخط يتقعّر نحو الأسفل (الخط الأزرق).

لقد درس الفريقان حتى الآن ما مجموعه بضعة عشرينات من المستعرات الأعظمية التي تتفرد بانزياح أحمر كبير، وهي تلك التي ثارت قبل ما بين أربعة بلايين وسبعة بلايين سنة، وذلك عندما كان عمر الكون نصف أو ثلثي عمره الحالي. بيد أن الفريقين أصيبا بدهشة شديدة حين وجدا أن المستعرات الأعظمية أخفت مما كانا يتوقعانه. لكن الفرق طفيف، إذ إن المستعرات الأعظمية البعيدة أعتم بنسبة 25 في المئة فقط مما كان يتنبأ به. بيد أن هذه النتيجة كافية لوضع النظريات الكوسمولوجية التي كانت قائمة زمناً طويلاً موضع تساؤل.

وقبل استخلاص أي نتائج حاسمة، بدأ الفلكيون من كلا الفريقين يتساءلون عما إذا كان ثمة تفسير مقبول للإعتام النسبي لهذه المستعرات الأعظمية القصيّة. وقد وُجّهت التهمة إلى الغبار الكوني الذي يمكنه حجب بعض الضوء. بيد أننا نظن أن بالإمكان استبعاد هذا الاحتمال، ذلك أن حبيبات الغبار تسعى إلى ترشيح الضوء الأزرق أكثر من الأحمر، وهذا يجعل المستعرات الأعظمية تبدو بلون أكثر احمراراً ممّا هي عليه في الواقع (بالطريقة نفسها التي تتلون بها الشمس عند الغروب بسبب غبار جو الأرض)، لكننا لا نلاحظ مثل هذا التغير. ويمكن أن نتوقع أيضاً أن الغبار الكوني يُحدث قدراً كبيراً من التغييرات في القياسات، ما لم يكن منتشراً انتشاراً منتظماً جداً في الفضاء، وهذا أمر لم نشاهده كذلك.

وثمة اضطراب محتمل آخر، ألا وهو التعدس[3] التثاقلي Gravitational lensing، أي انحناء الأشعة الضوئية خلال مرورها في جوار المجرات. ويُحدث هذا التعدس، من وقت لآخر، زيادة في السطوع، لكنه يخلّف في أغلب الأحيان تصغيراً، ومن ثم يمكنه الإسهام في إعتام المجرات الأعظمية النائية. لكن الحسابات تبين أن هذا الأثر لا يصبح مهماً إلا في المنابع الأبعد حتى من المستعرات الأعظمية التي ندرسها، ومن ثم يمكننا استبعاد هذا التعقيد أيضاً.

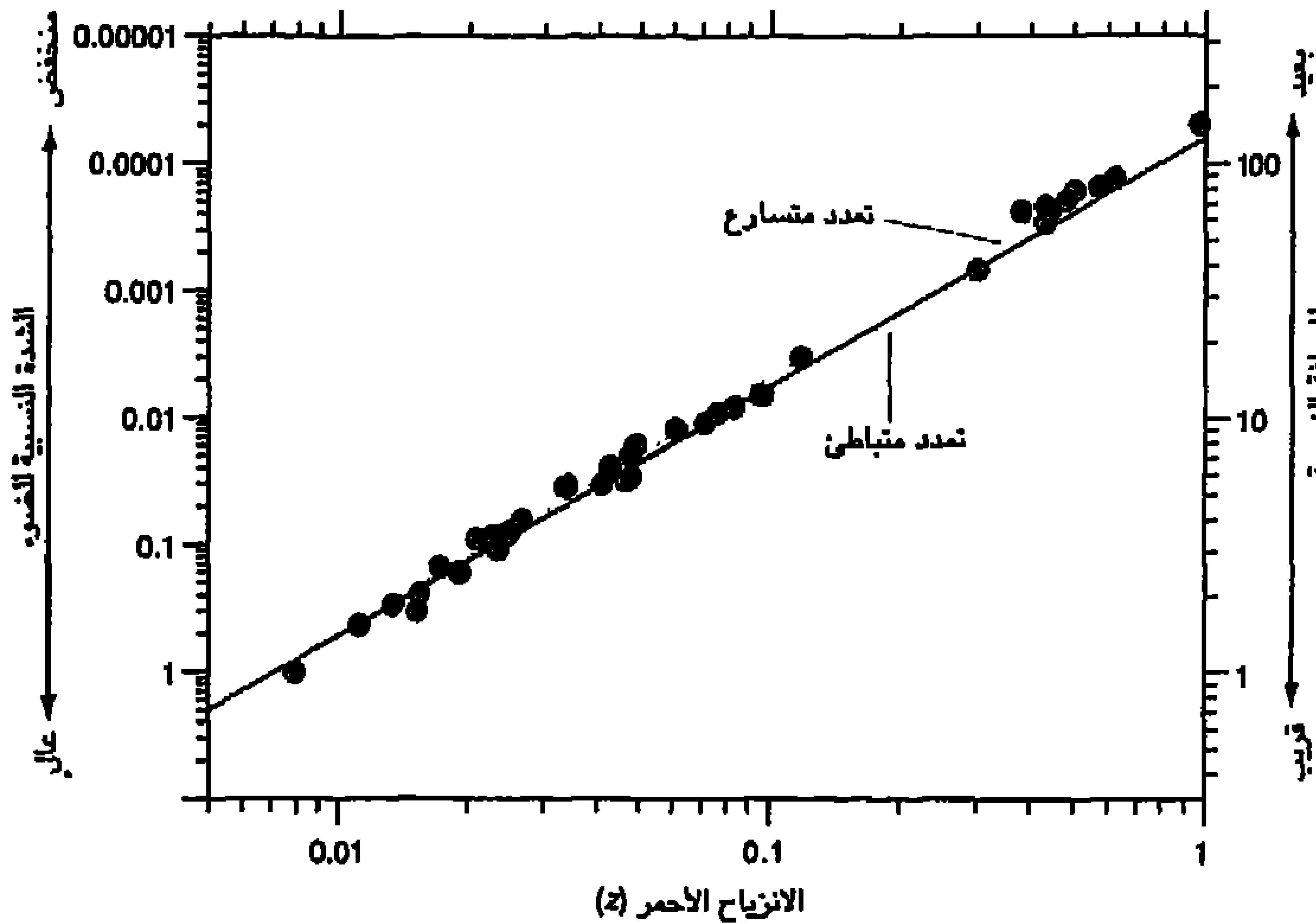
وأخيراً، كنا نخشى من كون المستعرات الأعظمية البعيدة مختلفة إلى حد ما عن القريبة منها، وربما كانت مكونة من نجوم أصغر سناً تحتوي على قدر أقل من العناصر الثقيلة مما هو نموذجي في المجرات الأكثر نضجاً. ومع أننا لا نستطيع إسقاط هذا الاحتمال، فإن تحليلنا يسعى إلى إدخال هذه الفروق في الاعتبار. ويبدو أن هذه التعديلات تكون مهمة عندما نطبقها على المجرات القريبة التي تختلف اختلافات كبيرة في أعمارها ومكوّناتها وأنواع المستعرات الأعظمية التي تُرى فيها.

ولمّا لم يكن أي من هذه الآثار الأرضية متفقاً مع الأرصاد الجديدة، فإننا نتجه مع علماء آخرين كثيرين إلى الظن بأن سبب شحوب المستعرات الأعظمية البعيدة هو بنية الكون. وقد تسهم في هذا الأمر خاصيتان مختلفتان للمكان والزمان.

إحدى هاتين الخاصيتين هي أنه قد يكون للفضاء تقوس سالب. ويمكن تقريب مثل هذا اللف إلى الأذهان بتشبيه ثنائي البعد. إن المخلوقات التي تعيش في عالم منبسط ثنائي البعد (مثل الشخوص التي أوردها (أ.إ. أبوت) في روايته الكلاسيكية بعنوان الأرض المنبسطة Flatland) ستجد أن لدائرة نصف قطرها r محيطاً قدره $2\pi r$ بالضبط. لكن إذا حُني عالَمهم واتخذ شكل سرج الحصان، كان له تقوس سالب صغير. وقد يكون المقيمون ثنائيو البعد في أرض سرجية الشكل غيرَ واعين لهذا التقوس إلى أن يقيسوا دائرة كبيرة لها قطر محدّد ويكتشفوا أن محيطها أكبر من $2\pi r$.

ولأسباب نظرية مختلفة، افترض معظم الكوسمولوجيين أن فضاءنا الثلاثي البعد، شأنه شأن الأرض المنبسطة، ليس مقوساً. بيد أنه

[3] انحناء الإشعاع تحت تأثير حقل تثاقلي قوي.



إن الأرصاد التي أجراها فريق مؤلفي هذه المقالة للمستعرات الأعظمية (النقاط الحمراء) تنحرف انحرافاً طفيفاً، لكن مهماً، عن النمط الذي توقعه كثير من النظريين – ونعني بذلك أن تباطؤاً سريعاً إلى حد ما (الخط الأزرق) يجب أن يحدث إذا كان الكون «منبسطاً» وليس له ثابت كوسمولوجي. وتشير هذه الأرصاد إلى أن الكون لا يحوي سوى 20 في المئة من المادة اللازمة لجعله منبسطاً بسبب كونه يتباطأ أشد مما كان متوقعاً (الخط الأسود). وتوحي القياسات بأن التمدد متسارع، وربما يكون ذلك بسبب ثابت كوسمولوجي مغاير للصفر (الخط الأحمر).

لو كان له تقوس سالب، لكان للقشرة الكروية الكبيرة من الإشعاع الصادر عن مستعر أعظم قديم مساحة أكبر من مساحتها في فضاء منبسط هندسياً، مما يجعل المصدر يبدو شاحباً شحوباً غريباً.

وثمة تفسير ثانٍ للإعتام غير المتوقع للمستعرات الأعظمية البعيدة مفاده هو أنّها مما توحي به انزياحاتها الحمراء. وبعبارة أخرى، يبدو أن للمستعرات الأعظمية الواقعة على هذه المسافات الهائلة انزياحاً أحمر أصغر مما كان يُتوقع. ولتفسير هذا الانزياح الأحمر الأصغر، يفترض الكوسمولوجيون أن الكون لابد من أن يكون قد تمدد ببطء أكبر في الماضي مما كانوا يتوقعون، وهذا يولّد تمدداً إجمالياً أصغر للكون وللضوء الذي ينتشر فيه.

القـوة

تُرى، ما هي أهمية أن يكون التمدد الكوني قد حدث ببطء أكبر مما كان يظنّه الفلكيون سابقاً؟ لو كان العالم مكوّناً من مادة عادية، لتعين على الثقالة أن تبطّئ تمدده باستمرار. ويقتضي بطء التمدد أن تكون الكثافة الإجمالية للمادة في الكون منخفضة، وهذا أمر تدل عليه قياسات المستعرات الأعظمية.

ومع أن هذه النتائج تقوّض النظريات التي كانت سائدة سابقاً، فإنها تتفق مع سياقات أخرى عديدة من الأدلة. وعلى سبيل المثال، لاحظ الفلكيون أن بعض النجوم تبدو أكبر سناً من العمر المقبول للكون – وهذه استحالة بيّنة. بيد أنه إذا كان الكون يتمدد ببطء أكبر في الماضي، كما تشير إلى ذلك الآن المستعرات الأعظمية، فإن عمره يجب أن يكبُر، وهذا قد يحل المشكلة. وتتوافق أيضاً النتائج الجديدة مع محاولات حديثة أخرى للتوثق من الكمية الكلية من المادة في الكون *[انظر: «نشوء الحشود المجرية وتطورها»، مجلة العلوم، العدد 4 (1999)، ص 16].*

تُرى، ما الذي يمليه الفهم الجديد لكثافة المادة في الكون بالنسبة إلى تقوس هذا الكون؟ إن مبادئ النسبية العامة تُفيد بأن التقوس والتباطؤ مرتبطان. وبصيغة مبسطة لما قاله (ج.أ. ويلر)، الذي كان أستاذاً في جامعة برنستون، نقول: إن المادة تخبر الزمكان كيف ينحني، والزمكان يخبر المادة كيف تتحرك، وتقتضي كثافة صغيرة للمادة تقوساً سالباً وتباطؤاً طفيفاً. وإذا كان الكون خاوياً تقريباً، فإن هذين الأثرين الإعتاميين يكونان قرب قيمتيهما العظميين النظريتين.

لقد كانت المفاجأة الكبرى هي أن المستعرات الأعظمية التي نراها أكثر شحوباً مما توقعنا حتى في عالم خاوٍ تقريباً (الذي له تقوس سالب أعظمي). وظاهرياً، يبدو أن أرصادنا تتطلب أن يكون التمدد متسارعاً فعلاً مع الزمن. والكون المؤلف من مادة عادية فقط، لا يمكن أن يكبر على هذا النحو لأن ثقالته تجذب دائماً. لكن نظرية آينشتاين تذهب إلى أن التمدد يمكن أن يتسارع إذا ملأ شكل غريب من الطاقة فضاء خاوياً في أي مكان. وتتجسد «الطاقة الخلائية» Vacuum Energy هذه في معادلات آينشتاين، كالذي يُطلق عليه اسم الثابت الكوسمولوجي. وخلافاً للأشكال المألوفة للمادة والطاقة، فإن الطاقة الخلائية تضيف ثقالة تنافرية Repulsive يمكن أن تدفع الكون بسرعات متزايدة أبداً . وإذا ما سلّمنا بهذه الإمكانية غير المألوفة، فيمكننا تفسير أرصادنا تماماً، حتى وإن قبلنا بالهندسة المنبسطة التي يؤثرها المنظّرون.

إن الدليل على وجود شكل غريب من الطاقة يمنح قوة تثاقلية تنافرية هو أهم النتائج المثيرة التي كنا نتطلع إلى تحقيقها، بيد أن مـا يذهلنا جداً هو أننا وآخرين مازلنا متشككين في هذه النتيجة. ولحسـن

الحظ، فإن التطورات في التقانة المتاحة للفلكيين، كالمحسات تحت الحمراء الحديثة والجيل التالي من المقراب الفضائي Next Generation Space Telescope، ستسمح لنا قريباً باختبار نتائجنا بتقديمها قدراً أكبر من الدقة والوثوقية؛ كما ستسمح لنا هذه التجهيزات الرائعة برصد حتى منارات أخفَتَ نوراً توهجت فجأة منذ زمن أبعد كثيراً في مجرات تفصلنا عنها مسافات أكبر وأكبر.

المؤلفون

C. J. Hogan - R. P. Kirshner - N. B. Suntzeff

لهم خبرة طويلة في الأجرام السماوية الكبيرة المتفجرة. حصل هوكان على الدكتوراه من جامعة كامبردج، وهو حاليّاً أستاذ ورئيس قسم علم الفلك في جامعة واشنطن. أما كيرشنر فقد حصل على الدكتوراه من معهد كاليفورنيا للتقانة خلال دراسته لمستعر أعظم من النمط Ia رُصد عام 1972 (وهو أسطع مستعر شوهد منذ عام 1937)، وهو أستاذ علم الفلك في جامعة هارفارد، كما يشغل منصب المدير المشارك لمركز هارفارد السميثسوني للفيزياء الفلكية. أما سنتزيف فقد حصل على الدكتوراه من جامعة كاليفورنيا من سانتا كروز، ويعمل في مرصد سيرو تولولو الأمريكي في لاسيرينا بجمهورية تشيلي.



مراجع للاستزادة

The Little Book Of The Big Bang. Craig J. Hogan. Springer- Verlag, 1998.

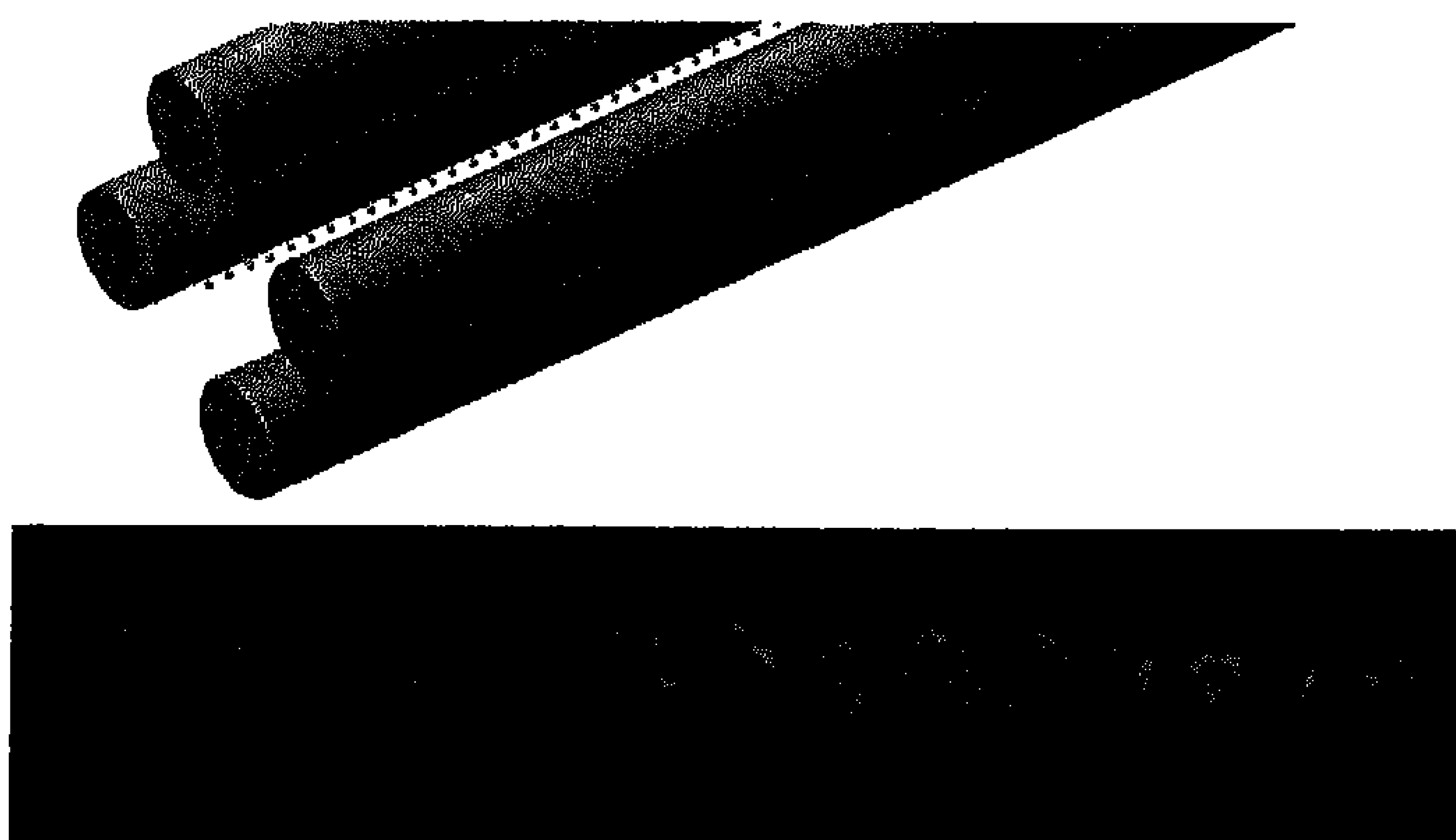
Discovery Of A Supernova Explosion At Half The Age Of The Universe. S. Perlmutter, G. Aldering, M. Della Valle, S. Deustua, R. S. Ellis, S. Fabbro, A. Fruchter, G. Goldhaber, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M.Y. Kim. R. A. Knop, C. Lidman, R. G. McMahon, Peter Nugent, R. Pain, N. Panagia, C. R. Pennypacker, P. Ruiz- Lapuente, B. Schaefer and N. Walton (The Supernova Cosmology Project) in Natu:e, Vol. 391, pages 51- 54, January 1, 1998. Preprint available at xxx. lanl. gov /abs/astro- ph/9712212 on the World Wide Web.

Observational Evidence From Supernovae For An Accelerating Universe AND A Cosmological Constant. Adam G. Riess, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiattia, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron, L. Gilliland, Craig J. Hogan, Saurabh Jha, Robert P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, David Reiss, Brian P. Schmidt, Robert A. Schommer, R. Chris Smith, J. Spyromilio, Christopher Stubbs, Nicholas B. Suntzeff and John Tonry in Astronomical Journal, Vol. 116, No. 3, Pages 1009- 1038 September 1998. Preprint at xxx. lanl. gov/abs/astro-ph/9805201 on the World Wide Web. Additional information on supernova searches is available at cfa- www. harvard. edu/cfa/oir/ Research/ supernova/ High Z. html and www-supernova. lbli. gov/ on the World Wide Web.

قياس دقيق للزمن

يؤدي تطوير مياقت دقيقة ـ لا يتعدى خطؤها ثانية واحدة خلال عدة ملايين من السنين ـ إلى تقدم جديد في اختبارات بالغة الدقة للنظرية النسبية، وإلى تحسين منظومات الملاحة.

(و.م. إيتانو) ـ (ن.ف. رامزي)



عند تشعيعها بضوء فوق بنفسجي، تصدر شوارد (أيونات) الزئبق (التي تم أسرها والتي تبعد عن بعضها بنحو 10 مكرونات) (فلورة) Fluorescence. وتؤسر الشوارد بوساطة حقول كهربائية مهتزة تولدها (المساري) Electrodes الأربعة. كما تمنع الكمونات الكهربائية الثابتة (غير مبينة في هذا الشكل) الشوارد من الهرب عند طرفي المصيدة. وربما ستسمح سلاسل من الشوارد المصيدة بظهور أجهزة جديدة أكثر استقراراً من المياقت الذرية العادية.

يشتكي بعض الناس من عدم دقة الساعات الحديثة، على الرغم من أن ساعات الكوارتز العادية والرخيصة الثمن لا يتعدى خطؤها ثانية واحدة في الأسبوع، وهذا ما يجعلها كافية تماماً لأغراض الاستعمالات اليومية. لكن التطبيقات الأكثر دقة، مثل الاتصالات بين المركبات الفضائية أو تعقب السفن والطائرات من الأقمار الصنعية فإنها تعتمد على مياقت ذرية لا تخطئ أكثر من ثانية واحدة على مدى مليون سنة.

وهكذا تبدو دقة المياقت كافية إلى قدر قد تنعدم الحاجة فيه إلى تطويرها أو الحصول على مياقت أدق منها، إلا أن العديد من التطبيقات العلمية والتقانية يحتاج إلى مياقت أكثر دقة. فعلى سبيل المثال، يمكن للنجوم النباضة (البلسار) pulsars (وهي نجوم تصدر الإشعاع الكهرمغنطيسي على شكل دفقات دورية) أن تكون أكثر استقراراً من المياقت الحالية. ولذلك لا يمكننا دراسة انتظام هذه النجوم دون استخدام مياقت أدق منها. كما قد تحتاج الاختبارات البالغة الدقة لنظرية النسبية والمبادئ الفيزيائية الأخرى إلى مياقت أكثر حساسية. وربما ستتوفر هذه المياقت قريباً، إذ توفر تقانات جديدة، معتمدة على التقاط وتبريد الذرات والشوارد، كل الإمكانات لصنع مياقت أدق بألف مرة من المياقت الحالية. وإذا كان التاريخ شاهداً فربما ستبين هذه المياقت المستقبلية بأن ما يبدو ثابتاً وغير قابل للتغير هو في الواقع تحريكي ومتغير إذا نظر إليه بمقاييس أدق. فالساعات الرملية والمائية أو الساعات النواسة (ذات البندول) في العهد الماضي كانت دقيقة بقدر كاف لتقسيم اليوم إلى ساعات ودقائق وثوان، ولكنها لا تستطيع استبيان التغيرات في زمن دوران الأرض حول نفسها أو حول الشمس.

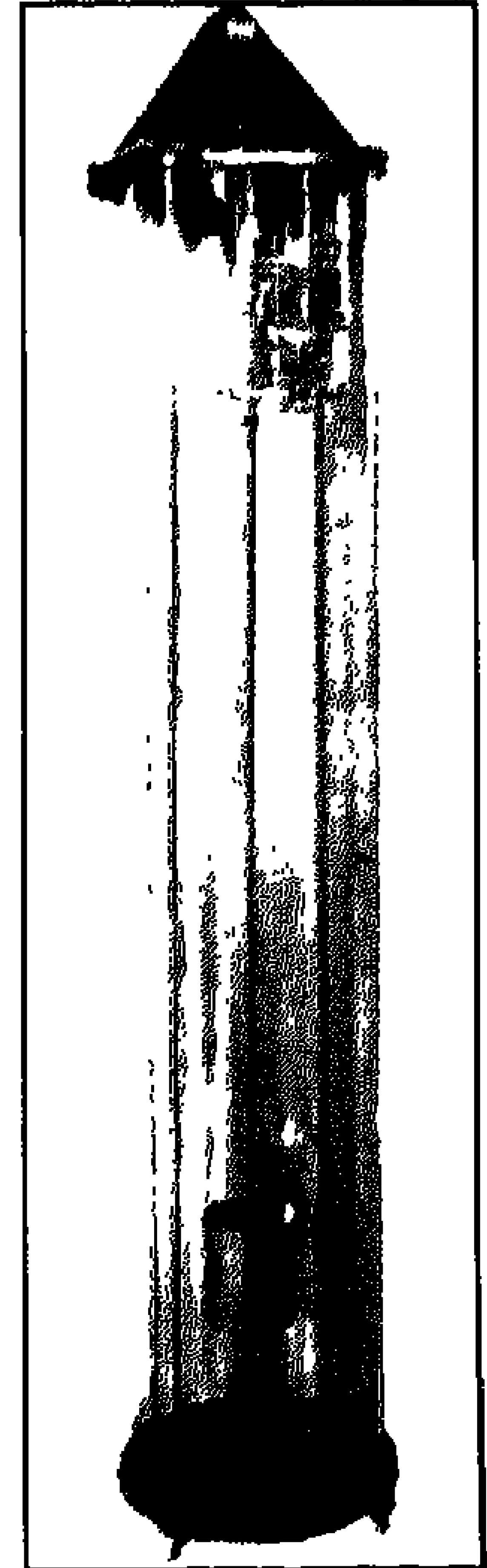
تعتمد دقة الميقت على انتظام حركة دورية ما. وتعتمد الساعات القديمة على الاهتزاز المتراكب للنواس في داخلها، حيث يقرن ذراع النواس مع جهاز يسمى الميزان escapement حيث يضرب الذراع أسنان دولاب مسنن ويجعله يتحرك في اتجاه واحد. وينقل هذا الدولاب الحركة ـ عن طريق مسننات أخرى عادة ـ إلى عقارب الساعة. وتتوجه معظم جهود تحسين الساعات إلى إيجاد منظومات تكون فيها الاهتزازات عالية الانتظام.

إن معايير التردد (التواتر) الثلاثة الأكثر أهمية هي الاستقرار والتكرارية والدقة. فالاستقرار هو قياس بقاء التردد ثابتاً خلال فاصل زمني معين، وهو يعتمد على طول الفاصل الزمني المرصود. ويمكن للتأرجح في تردد معيار ما أن يبلغ جزءاً من مئة بليون (البليون هو ألف مليون) بين ثانية والتي تليها، أو جزءاً من عشرة بلايين بين السنة والسنة التالية. وتشير التكرارية إلى مقدرة أجهزة مستقلة لها التصميم نفسه على إعطاء القيمة نفسها. أما الدقة فهي قياس الدرجة التي يعيد بها الميقت فاصلاً زمنياً محدداً، مثل ثانية واحدة.

وحتى بدايات القرن العشرين ظل اعتماد أدق المياقت قائماً على انتظام حركات النواس. وقد انتبه غاليليو إلى هذه الخاصية في النواس بعد ملاحظته أن دور الاهتزاز مستقل تقريباً عن سعته عندما تكون هذه السعة صغيرة. وبعبارة أخرى يمكننا القول بأن النواس يكمل دورة واحدة خلال فترة زمنية واحدة وبشكل مستقل عن سعة كل دورة. وقد توفرت الساعات النواسة بشكل واسع بعد منتصف القرن السابع عشر عندما اخترع العالم الهولندي ش.هويكنز ميزاناً يبقي على اهتزاز النواس. ثم اخترع مقاييس تستخدم تذبذب **عجلات الميزان** balance wheels الموصولة بالنوابض. وتكمن ميزة هذه الأجهزة في سهولة حملها وفي استخدامها على سطوح البواخر.

وقد أبدى صانعو الساعات براعة كبيرة في تحسين دقة الساعات النواسة والمسننات من أجل التعويض عن تغيرات الأطوال المعدنية الناتجة من التغيرات الحرارية، فقاموا بالجمع بين مواد ذات معدلات تمدد حراري مختلفة. ثم أتت معالجة جذرية خلال العشرينات من هذا القرن عندما صنع المهندس البريطاني و.هـ. شورت ساعة يزامن synchronize فيها نواس تابع slave مع آخر حر free. ويهتز النواس الحر في وسط منخفض الضغط، وهو لا يشغل مباشرة أية آلية للساعة، بل يشغل مفتاحاً كهربائياً يساعد على إبقاء النواس التابع متزامناً. وفي النتيجة كان دور الساعة مستقراً جداً ويبلغ خطؤه عدة ثوان في السنة (نحو ثانية في كل عشرة ملايين ثانية)، وقد أصبح منذ ذلك الوقت مرجعاً لقياس الوقت في المخابر (المختبرات) العلمية.

اعتمد التقدم الرئيسي اللاحق في مجال ضبط الوقت على تطوير **هزازات** oscillators إلكترونية ذات بلورة من كوارتز. ويعتمد تردد هذه الأجهزة على تردد **الارتجاج** vibration المرن لبلورة كوارتز مقطوعة بدقة في مقاس معين. ويتم الحفاظ على الارتجاج في هذه البلورة بفضل خاصية لها تدعى **كهربائية الإجهاد** piezoelectricity، إذ يولد تطبيق إجهاد ميكانيكي على البلورة تياراً كهربائياً ضعيفاً. وبالعكس، يحدث تطبيق فرق كمون كهربائي تمدداً أو تقلصاً في البلورة.



يهتز النواس (البندول) الرئيسي، الذي اخترعه في العشرينيات المهندس الإنكليزي شورت، في مغلف مخلي، وهو يشغل مفتاحاً كهربائياً ليزامن نواساً تابعاً. ويكون عمل النواس الأخير هو التحكم في آلية الميقت.

يرتج الكوارتز بتردد يعتمد على شكل وأبعاد البلورة. ففي بعض ساعات اليد تقطع البلورة على شكل U بطول قدره عدة ميلمترات. وفي الساعات الأخرى تأخذ شكل رقاقة مسطحة. كما يوصل الكوارتز بدارة كهربائية تنتج تياراً متناوباً. حيث تسبب **التغذية المرتدة** feedback الكهربائية من الكوارتز **مواءمة** matching تردد هذه الدارة مع تردد الارتجاج الطبيعي للبلورة (الذي يبلغ عادة 32768 هرتز). ويسري التيار المتناوب من الدارة إلى **مقسم التردد** frequency divider، وهو جهاز إلكتروني رقمي يولد نبضة خرج واحدة من أجل عدد محدد من نبضات الدخل. كما يشغل المقسم مؤشرات أو شاشة عرض رقمي.

في أواخر العشرينات صنع كل من ج.و. هورتون و و.أ. ماريسون (العاملين وقتذاك في مخابر بل) أول ساعة تعتمد على هزاز بلورة الكوارتز. وفي الأربعينات حلت هذه الساعات محل ساعات شورت كمعايير زمنية أولية للمخابر. وقد كانت هذه الساعات مستقرة إلى نحو 0.1 مليثانية في اليوم (تقريباً جزء من بليون) ورخيصة الثمن نسبياً، ولهذا استمر استعمالها بشكل واسع حتى اليوم. وما عناصر ضبط الوقت في ساعات الكوارتز الشائعة والمياقت إلا نسخ مبسطة ومصغرة عن معايير تردد الكوارتز. وقد أصبحت ساعات الكوارتز شائعة عندما أمكن قطع الكوارتز بدقة بمقاطع رقيقة وعلى شكل حرف U، وصنع مركبات إلكترونية رقمية ذات طاقة منخفضة.

لكن ساعات بلورة الكوارتز لم تكن كافية للكثير من التطبيقات العلمية مثل اختبارات ظواهر نظرية النسبية. فوفقاً لحسابات ألبرت آينشتين، تشوه **الثقالة** gravity المكان والزمان. ويسبب الفرق في **الكمون التثاقلي** gravitional potential مرور الزمن عند ارتفاعات عالية بشكل أسرع من مروره على سطح الأرض، لكن هذا الفرق ضئيل جداً، فالزمن في أعلى قمة إفرست يمر بسرعة أكبر بثلاثين جزءاً من مليون من الثانية من مروره عند سطح البحر. إلا أن معايير التردد الذري هي وحدها التي تحقق الوصول إلى هذه الدقة المطلوبة.

وتشكل مستويات الطاقة **المكممة** quantized في الذرات والجزيئات الأسس الفيزيائية لمعايير التردد الذري. فتنص قوانين الميكانيك الكمومي على أن لطاقات منظومة مرتبطة مثل الذرة عدداً من القيم المتقطعة. وبوسع حقل كهرمغنطيسي ما أن يرفع ذرة من مستوى طاقي إلى مستوى أعلى. كما يمكن أن تتم هذه العملية في الاتجاه المعاكس، فإذا كانت الذرة في مستوى طاقي عال يمكنها الهبوط إلى مستوى أخفض مصدرة عند ذلك طاقة كهرمغنطيسية.

يتم امتصاص الطاقة أو إصدارها بقدر أعظمي عند تردد معين هو تردد التجاوب (وهو يقابل الفرق بين طاقة المستويين مقسوماً على ثابت بلانك)، وتدعى هذه القيمة أحياناً تردد بور. وتكون هذه

الترددات معايير زمنية مثالية لأنها مستقرة تماماً، حيث يمكن ضبط الوقت برصد ترددات الطاقة الكهرمغنطيسية التي تصدرها الذرات أو تمتصها. وتعمل الذرات من حيث الجوهر عمل نواس (بندول) رئيسي master penduLum تعد اهتزازاته للتعبير عن مرور الزمن.

وعلى الرغم من أننا قد وصفنا ببساطة الخصائص الكمومية العامة للميقت الذري فإن المفاعيل التي يتضمنها معقدة شيئاً ما. ففي معظم المياقت الذرية تنتج الطاقة التي تمتصها الذرات أو تصدرها عن الانتقالات بين المستويات الطاقية **الفائقة الدقة** hyperfine. وتنشأ هذه المستويات عن خاصية ذاتية للجسيمات تعرف باسم **العزم المغنطيسي** magnetic moment. إذ تدور الإلكترونات ونوى معظم الذرات حول محاورها وكأنها الدوامة top إضافة إلى أنها تكون ممغنطة كإبرة بوصلة تتوجه بموازاة محور دورانها. وهكذا، فعندما تتغير توجهات المحاور بالنسبة إلى بعضها بعضاً فإن الطاقة المغنطيسية تتغير بدورها، وتقابل هذه التغيرات مستويات الطاقة الفائقة الدقة. وقد أتت تسمية هذه المستويات بسبب ملاحظتها للمرة الأولى أثناء دراسة الأطياف كانشطارات صغيرة في الخطوط الطيفية.

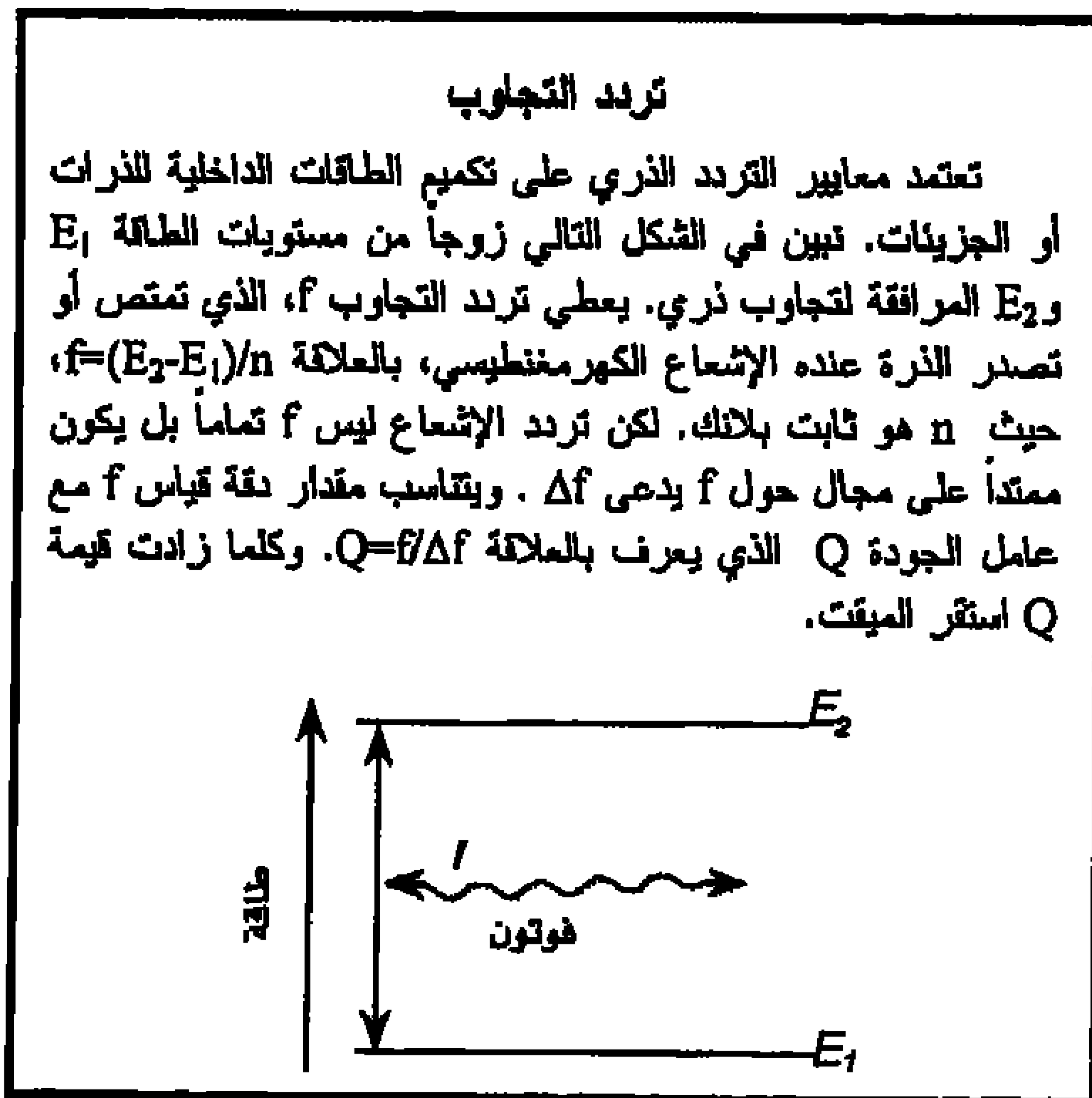
إذاً، من ناحية نظرية تكون المعايير المعتمدة على العمليات الذرية مثالية. لكن الكمال عسير المنال عملياً، إذ أن الذرات لا تمتص الطاقة أو تصدرها عند تردد التجاوب تماماً. وينتشر بعض الطاقة على فاصل صغير حول هذا التردد (وهذا ما يشكل مجموعة من الترددات بدلاً من تردد واحد). وتتناسب دقة قياس تردد التجاوب عكساً مع هذا الانتشار، فكلما زاد هذا الأخير قلت دقة القياس. ويعبر عن هذا الانتشار عادة بوساطة عامل الجودة (Q) quality factor الذي يساوي تردد التجاوب مقسوماً على انتشار التردد... وفي كثير من الحالات كلما ارتفع تردد التجاوب ارتفع عامل الجودة Q علاوة على ذلك، يتناسب الانتشار عادة عكساً مع مدة وجود الذرة في الجهاز. وفي هذه الأحوال يزداد عامل جودة التجاوب (وبالتالي دقة القياس) كلما طالت مدة القياس.

تدخل حركات الذرات ارتياباً على شكل انزياحات ظاهرية في الترددات الذرية، وتظهر هذه التغيرات بسبب **مفعول دوبلر** Doppler effect. ويمكن تقسيم هذه الظاهرة إلى انزياحات من المرتبة الأولى والثانية. فانزياح دوبلر من المرتبة الأولى هو تغير ظاهري في تردد موجة الحقل الكهرمغنطيسي المطبق «الذي تراه الذرة» ويتناسب مقدار الانزياح مع سرعة الذرة عندما تكون هذه السرعة أصغر بكثير من سرعة الضوء. فإذا تحركت الذرة في اتجاه الموجة نفسه، يكون الانزياح نحو الترددات الأدنى. وإذا كان اتجاه حركة الذرة معاكساً لاتجاه حركة الموجة، فإن الانزياح يكون نحو الترددات الأعلى. أما إذا كان الاتجاهان متعامدين، فإن الانزياح من المرتبة الأولى يكون معدوماً.

ويحدث الانزياح من المرتبة الثانية نتيجة لتمدد الزمن. فوفقاً لنظرية النسبية، يتباطأ الزمن من أجل الجسيمات المتحركة، وهذا يعني أن الذرة المتحركة «ترى» تردداً مختلفاً قليلاً عن التردد الذي تراه الذرة الثابتة في مكانها. وعادة، يكون التأثير في تردد التجاوب أصغر بكثير مما هو في الانزياح من المرتبة الأولى. ويتناسب الانزياح من المرتبة الثانية مع مربع السرعة الذرية، وهو لا يتعلق بالاتجاهات النسبية بين الذرة المتحركة والموجة الكهرمغنطيسية.

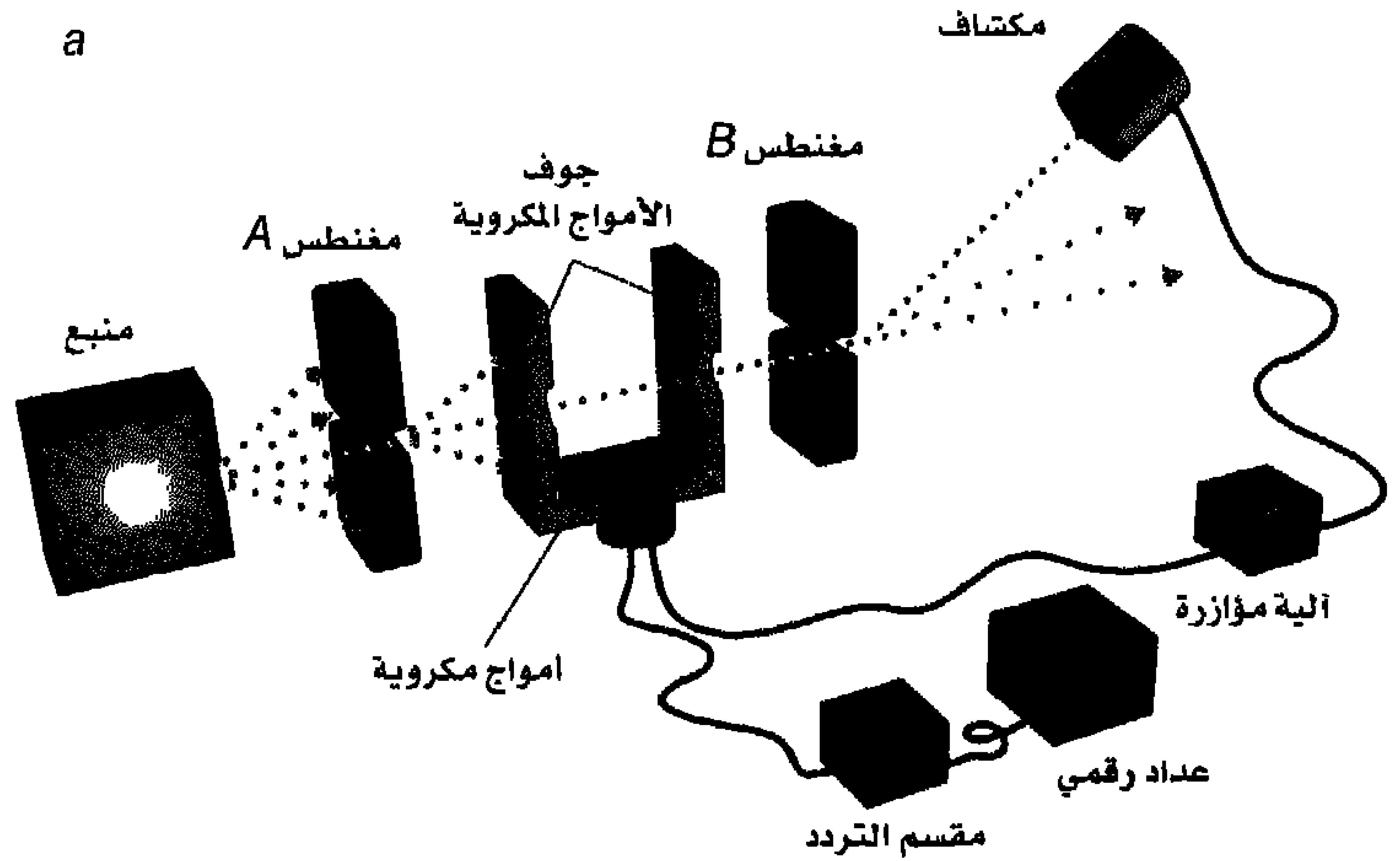
وتوجد عوامل عديدة مؤثرة في نوع المعلومات التي نرصدها (بسبب توسع الخطوط الطيفية). إذ يمكن أن تتصادم الذرات مع بعضها في داخل المنظومة فتضيف هذه التصادمات ضجيجاً إلى الإشارة. ويمكن أن يسبب الوسط المحيط بالذرات اضطراب ترددات التجاوب. فالخلل في الأجهزة الإلكترونية وتشويش الحقول الكهرمغنطيسية والإشعاع الحراري المتواجد دائماً هي أيضاً مصادر للأخطاء التي لا نستطيع تلافيها تماماً. ولهذا يجب على معيار التردد الذري الجيد ليس فقط أن يعين إشارة مستقرة ودورية بل ينبغي عليه التقليل من إمكان حدوث هذه الأخطاء.

وإحدى أولى الطرق (المستعملة حالياً بشكل واسع) التي عملت على تجنب الكثير من هذه المصاعب هي طريقة تجاوب الحزمة الذرية التي ابتكرها إ.إ. رابي وزملاؤه من جامعة كولومبيا في الثلاثينات. في هذه الطريقة تخرج الذرات من حجرة صغيرة عن طريق شق ضيق ثم تتحرك على شكل حزمة. ويمكن حجب الجهاز بأكمله عن الحقول الكهربائية والمغنطيسية المشوشة وعزله عن مصادر الحرارة الخارجية. أما الشيء الأكثر أهمية فهو تقليل احتمال اصطدام الذرات وذلك بوضع الجهاز في حجرة طويلة ومفرغة. يخفض الضغط في الحجرة إلى حد يصبح احتمال اصطدام الذرات بأي شيء ضئيلاً قبل وصولها إلى نهاية الطرف الآخر من الجهاز.



تردد التجاوب

تعتمد معايير التردد الذري على تكميم الطاقات الداخلية للذرات أو الجزيئات. نبين في الشكل التالي زوجاً من مستويات الطاقة E_1 وE_2 المرافقة لتجاوب ذري. يعطي تردد التجاوب f، الذي تمتص أو تصدر الذرة عنده الإشعاع الكهرمغنطيسي، بالعلاقة $f=(E_2-E_1)/h$، حيث h هو ثابت بلانك. لكن تردد الإشعاع ليس f تماماً بل يكون ممتداً على مجال حول f يدعى Δf . ويتناسب مقدار دقة قياس f مع عامل الجودة Q الذي يعرف بالعلاقة $Q=f/\Delta f$. وكلما زادت قيمة Q استقر الميقت.



تعطي معايير التردد باستخدام الحزمة الذرية أدق ضبط للوقت لفترة طويلة. وتعتمد المياقت الذرية على المخطط (في الشكل a). تُحرف الذرات التي تكون في مستوى ذري صحيح بوساطة مغنطيس A نحو جوف للأمواج المكروية. وتهتز حقول هذه الأخيرة عند تردد تجاوب الذرات بحيث تنقل بعض الذرات إلى مستوى طاقي ثان، ثم تحرف هذه الذرات بوساطة مغنطيس B بحيث تصل إلى مكشاف. تضبط آلية مؤازرة المكشاف بحيث تبقي تردد الأمواج المكروية المطبقة ⬅

ويمكننا القول، بشكل مبسط، إن طريقة تجاوب الحزمة الذرية تنطوي على ثلاث خطوات، الأولى هي انتقاء الذرات التي تكون في المستوى الطاقي المناسب من بين جميع الذرات، وذلك عن طريق استعمال حقل مغنطيسي مصمم خصيصاً للقيام بعمل المرشح، فهو يسمح للذرات التي توجد في مستوى طاقي واحد بالمرور ويحجب الذرات الأخرى: يتم حني الذرات الموجودة في المستوى الطاقي المرغوب بقدر مناسب لكي تصل إلى داخل شق يعمل كمدخل إلى الجوف.

أما الخطوة الثانية والحاسمة فهي نقل الذرات المنتقاة إلى مستوى طاقي آخر. وتتم هذه العملية بإمرار الذرات عبر حقل مهتز للأمواج المكروية موجود في داخل الجوف ، وتصل الذرات إلى هذا المستوى الطاقي فقط عندما يتوائم تردد الأمواج المكروية المهتزة مع تردد بور للذرات.

وفي الخطوة الثالثة يتم كشف الذرات التي غيرت مستويات طاقاتها. وفي هذه المرحلة تمر حزمة الذرات خلال مرشح ثان مؤلف من حقل مغنطيسي مهتز أيضاً، وهو يسمح للذرات التي تكون في المستوى الطاقي الصحيح بالوصول إلى المكشاف الذي يسجل وصول الذرات على شكل تيار كهربائي. وستوجد وفرة من هذه الذرات إذا تواءم تردد الأمواج المكروية المهتزة المطبقة مع التردد الطبيعي للذرات. أما إذا اختلف تردد حقل الأمواج المكروية المطبق فستتغير بعض الذرات من مستوياتها الطاقية وبالتالي سيصل القليل منها إلى المكشاف . وهكذا نعلم أن الأمواج المكروية توائم التردد الطبيعي للذرات إذا كان عدد الذرات الواصلة إلى المكشاف أعظمياً، ومن ناحية أخرى تحافظ آلية تغذية مرتدة إلكترونية تدعى دارة مؤازرة servo loop على قيمة التردد ثابتة. فإذا وجدت أن قيمة التيار قد هبطت فإنها تغير تردد الحقل المطبق إلى أن يصل التيار إلى قيمته العظمى مرة ثانية.

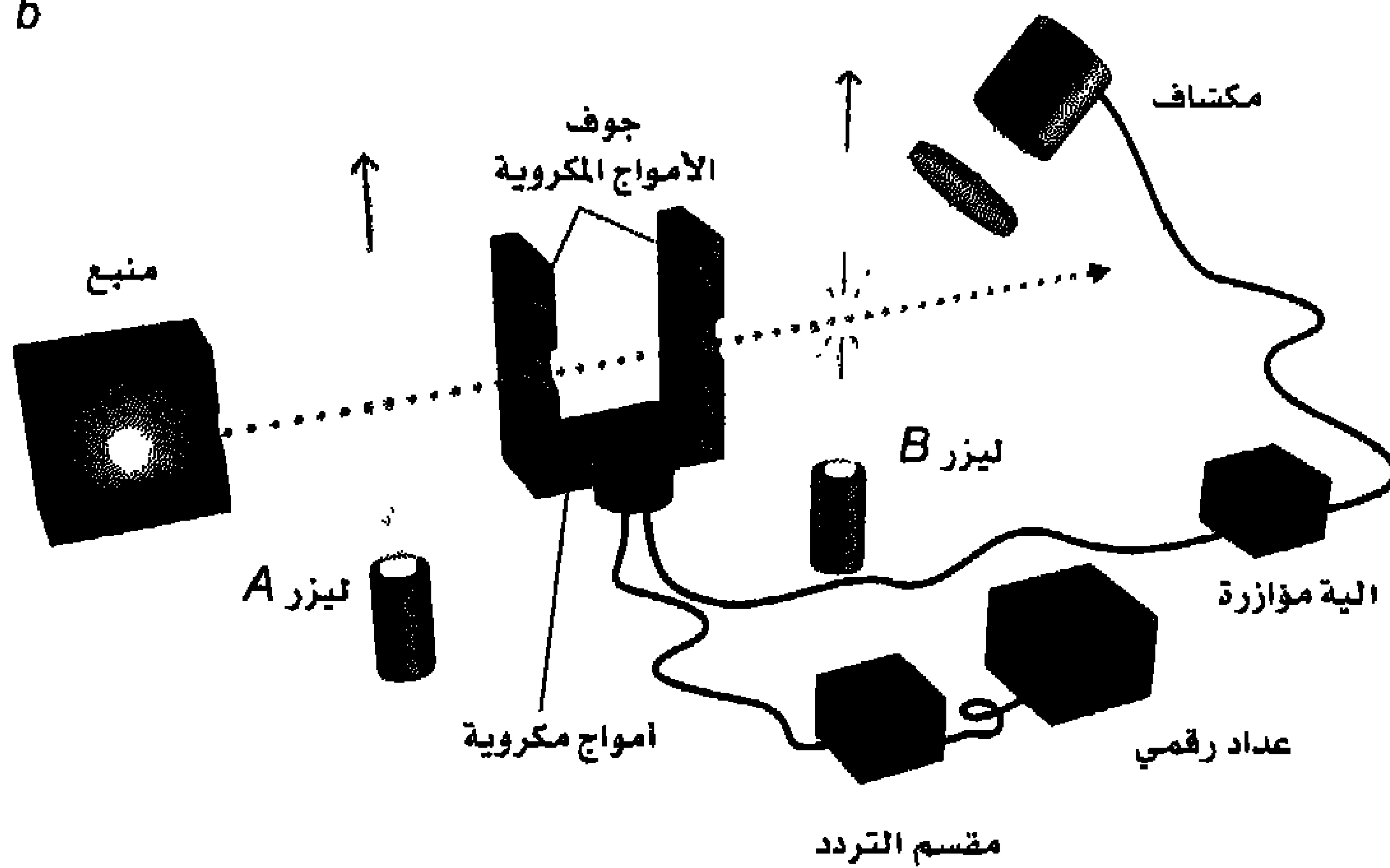
فبالمحافظة على تيار المكشاف أعظمياً تحافظ دارة المؤازرة على تردد حقل الأمواج المكروية عند التردد الطبيعي للذرات. ولقياس الزمن فإننا نقرن الحقل المطبق مع مقسم للتردد مهمته تولي **نبضات موقتة** Timing pulses. وبعمل مقارنة بسيطة نرى أن الذرات تمثل بلورة الكوارتز في ساعة المعصم أو النواس الحاكم في ميقت شورت، كما يعمل حقل الأمواج المكروية المطبق عمل الدارة المهتزة أو النواس التابع الذي يقود فعلياً آلية الميقت.

وتوجد بعض التنويعات على معيار الحزمة الذرية، فمثلاً، يعمل في بعض الأجهزة على ألا تصل الذرات التي تعاني انتقالاً طاقياً إلى المكشاف وذلك بخلاف الحالة السابقة. لكنه لا يوجد أي اختلاف محسوس في الدقة بين الطريقتين. وفي الحقيقة تحقق كل هذه الأساليب أغراضاً معينة من ناحية مقاسات الجهاز وكلفته ودرجة تعقيده.

وقد أتى تعديل مهم على طريقة الحزمة الذرية في عام 1949 عندما اخترع أحدنا (رامزي) ما يدعى طريقة **الحقل الهزاز المنفصل** separated oscillatory field. فبدلاً من تشعيع الذرات بتطبيق حقل واحد، تعتمد هذه الطريقة على استعمال حقلين تفصلهما بعض المسافة على طول مسار الحزمة. ولتطبيق الحقل المهتز على مرحلتين فوائد عديدة منها تضييق العرض الطيفي للتجاوب والتخلص من مفعول دوبلر من المرتبة الأولى. وقد اعتمد ج.ر. زاكرياس (من معهد ماستشوستس للتقانة) و ل.إسن و ج.ف.ل. باري (من المخبر الفيزيائي الوطني في تدينكتون بإنكلترا) هذه الطريقة في العمل على أول معايير التردد في أواسط الخمسينيات.

وتعطي طريقة الحقل المنفصل حالياً أكثر المياقت تكرارية حيث يوجد أفضلها في بعض المخابر الوطنية، كما تتوفر نسخ أصغر (ولكنها أقل دقة) بشكل تجاري. وتعتمد هذه المياقت على عنصر السيزيوم Cesium الذي يملك الكثير من الميزات مقارنة بالعناصر الأخرى، إذ أن له تردد تجاوب عالياً نسبياً —

➡ عند تردد التجاوب. وللحفاظ على الاستمرارية توجه بعض الأمواج المكروية إلى جهاز يقسم التردد إلى نبضات موقتة. أما المعايير الضوئية فهي تستخدم الضوء بدلاً من المغانط في انتقاء الذرات. يرفع الليزر A الذرات إلى المستوى الطاقي المناسب ويحضرها للإثارة بوساطة الأمواج المكروية. وتمتص الذرات وحدها التي وضعتها الأمواج المكروية في مستوى الطاقة المطلوب ضوء الليزر B، وسرعان ما تعيد إصدار هذه الطاقة على شكل فوتونات يلتقطها مكشاف.



نحو 9192 ميكاهرتز ـ وعرض تجاوب صغيراً جداً، وهذا ما يعطيه عامل جودة Q ممتاز. كما يمكن كشف السيزيوم بسهولة وبفاعلية، وكل ما نحتاج إليه هو سلك معدني مسخن. فعندما تصطدم ذرة السيزيوم بالسلك فإنها تتشرد، وهكذا نستطيع رصدها على شكل تيار كهربائي.

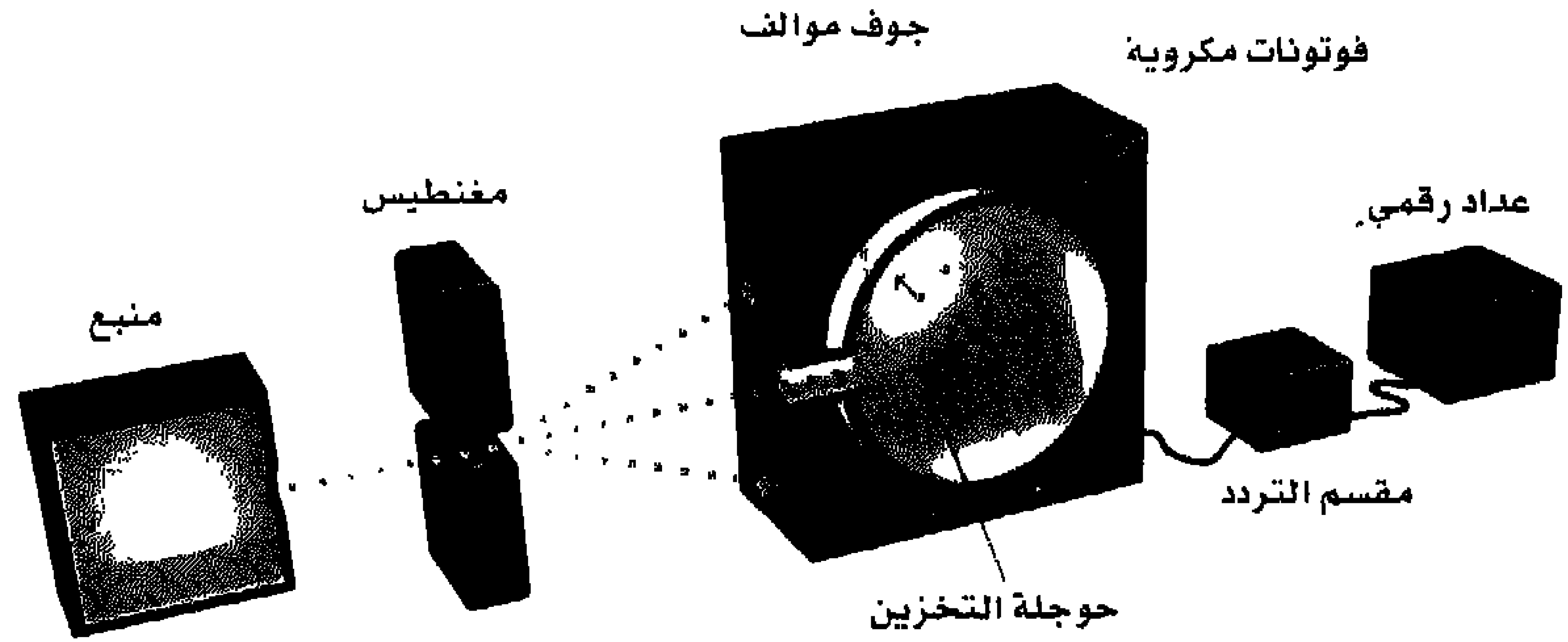
تبلغ عوامل جودة Qs هذه المعايير نحو 100 مليون، وهذا ما يزيد على عامل جودة ساعات المعصم عدة آلاف من المرات. أما أكبر قيمة تكرارية فيها فلا تتجاوز ثانية واحدة في 10^{14} ثانية (نحو عدة ثوان في كل عشرة ملايين سنة). ولأفضل معايير تردد السيزيوم تكرارية تفوق بكثير تكرارية دوران الأرض حول الشمس وحول نفسها إلى درجة أنه تم تعريف الثانية عام 1967 بأنها 9192631770 دور تجاوب ذرة السيزيوم 133.

إن أحد أهم التحسينات التي أدخلت على معايير الحزمة الذرية هو استعمال **الضخ الضوئي** optical pumping لانتقاء الحالات الذرية. ففي بداية الخمسينيات تم تطوير طرق الضخ الضوئي بوساطة كل من ف. بيتر من معهد ماستشوستس للتقانة و أ. كاسلر وج. بروسل من دار المعلمين العليا في باريس وآخرين غيرهم. وفي هذه الطريقة ينتقي الضوء ـ بدلاً من الحقل المغنطيسي ـ الذرات في الحالات المرغوبة. فقبل تعرض الذرات لحقل الأمواج المكروية يستخدم إشعاع الليزر لنقل (لضخ) الذرات من مستوى طاقي ما إلى مستوى آخر. وفي الحقيقة يمكننا التحكم في عدد الذرات التي نريد وضعها في عدد من المستويات الطاقية **بموالفة** tuning تردد الضوء.

تمر الذرات بعد تشعيعها بحقل الأمواج المكروية عبر حزمة ضوئية ثانية. وتمتص الذرات فقط التي توجد في المستوى الطاقي الصحيح بعض الطاقة الضوئية من الحزمة، ثم ماتلبث أن تعيد إصدارها بسرعة. ويسجل مكشاف حساس للضوء إعادة الإصدار هذه ويحولها إلى تيار كهربائي مقيس بسهولة. وعلى غرار طريقة تجاوب الحزمة الذرية التي تعتمد على الانتقاء المغنطيسي فإننا نعلم أن حقل الأمواج المكروية المطبق يتواءم مع التردد الطبيعي للذرات إذا كان تيار المكشاف عند قيمته العظمى.

ولاستعمال الضوء بدلاً من المغانط فوائد جمة، ربما كان أهمها هو إمكان وضع كل ذرات الحزمة في المستوى الطاقي المطلوب باستعمال طرق الضخ الضوئي المناسبة، في حين يرشح الانتقاء المغنطيسي الذرات التي تكون في المستويات الطاقية الأخرى. وبالتالي تكون شدة الإشارة الناتجة من الضخ الضوئي أكبر بكثير من شدة الإشارة الناتجة من الانتقاء المغنطيسي. ويطور الباحثون في مختلف المخابر مياقت الحزمة الذرية للسيزيوم المضخوخ ضوئياً، حيث أصبح أحدها مؤخراً (وهو موجود في المعهد الوطني للمعايير والتقانات (NIST) في بولدر بولاية كولورادو) المعيار الأولي للتردد في الولايات المتحدة الأمريكية، ويعرف بالرمز NIST-7، وله خطأ مقبول قدره ثانية واحدة في كل مليون سنة تقريباً، وهذا ما يجعله أدق بمرات عديدة من سابقه.

ويتوفر ميقت ذري مضخوخ ضوئياً بشكل تجاري. وهو يعتمد على التجاوب الفائق الدقة للروبيديوم rubidum 87 البالغ 6835 ميكاهرتز. وبدلاً من أن تتحرك ذرات الروبيديوم كحزمة في الجهاز فإنها تبقى محصورة داخل خلية زجاجية حيث يمنعها مزيج غازي من الاصطدام بجوانب الخلية. كما يستخدم مصباح **تفريغ** discharge يحتوي على الروبيديوم لتشعيع الذرات بدلاً من استخدام الليزر. ويكشف **مجس فوتوفولتي** photovoltaic sensor موضوع في الطرف الآخر من الخلية عن التغيرات في كمية الضوء الذي امتصته الذرات. وهكذا تحضَّر الذرات ويطبَّق عليها حقل الأمواج المكروية ثم يكشف عن الضوء في خلية واحدة. وبالنتيجة يمكن عمل مياقت الروبيديوم ضمن مكعب ضلعه 10 سنتيمترات. وبالمقابل يتراوح طول مياقت حزمة السيزيوم من نحو 50 سنتيمتراً إلى أكثر من 5 أمتار. إضافة إلى ذلك، فإن مياقت الروبيديوم أقل كلفة بكثير من مياقت السيزيوم.



يعتمد ميزر الهيدروجين الذري على حقل للأمواج المكروية ذاتي الأداء يعمل كمعيار للتردد. تحرف ذرات الهيدروجين، التي تكون في مستوى طاقي مناسب، بوساطة مغنطيس بحيث تدخل في حوجلة تخزين، تهبط بعض الذرات إلى مستوى أخفض مطلقة فوتوناً في مجال الأمواج المكروية. ويحث هذا الفوتون ذرات أخرى لكي تهبط بدورها إلى مستوى أخفض ، وهذا ما يولد فوتونات جديدة. وهكذا تؤدي هذه العملية إلى تعاظم حقل الأمواج المكروية في الوعاء، ثم يؤدي الحقل إلى ظهور تيار متناوب في سلك موضوع داخل الجوف. كما يساعد الجوف الموالف على إعادة توجيه الفوتونات ثانية نحو الوعاء لكي تظل العملية مستمرة.

ولكن أجهزة الروبيديوم أقل دقة وتكرارية بصورة عامة. ويبلغ عامل الجودة في معايير الروبيديوم نحو 10 ملايين، وهو أقل بعشر مرات من عامل جودة حزمة السيزيوم. كما تبلغ تكراريته نحو جزء من 10^{10} فقط (أي عدة ثوان كل ألف سنة). وتؤثر الانزياحات في تردد التجاوب بشكل رئيسي على ضعف التكرارية حيث تسبب الاصطدامات المتكررة لذرات الروبيديوم مع جزيئات الغاز الأخرى هذه الانزياحات كلها. ولكن استقرار معايير الروبيديوم على المدى القصير يكون جيداً بل إنه أفضل من استقرار بعض الحزم الذرية للسيزيوم.

ولعلنا نلاحظ أن للميقاتات الذرية الموصوفة سابقاً طريقة عمل غير مباشرة. فهي تعتمد على كشف التغير في إشارة ما مثل التغير في عدد الذرات الواصلة إلى المكشاف عندما يتغير تردد الحقل المهتز. وتعتمد إحدى الطرق التي تستفيد من الإشعاع الذي تصدره الذرات بشكل مباشر على مبدأ الميزر maser (وهو اختصار لتضخيم الأمواج المكروية بوساطة الإصدار المحثوث للإشعاع). وقد اخترع ش.هـ. تاونس ومساعدوه أول ميزر عام 1953 في جامعة كولمبيا، وكان يعتمد على غاز النشادر ammonia ثم طور رامزي وزملاؤه عام 1960 ميزر الهيدروجين الذري وهو الصنف الوحيد الذي استخدم بشكل واسع في الميقاتات الذرية.

وفي هذا الجهاز يعمل تفريغ كهربائي في مجال الأمواج الراديوية على فصم جزيئات الهيدروجين الموضوعة تحت ضغط عال في إناء مغلق ويحولها إلى ذرات مفردة. وتنطلق الذرات من فتحة صغيرة في الوعاء لتشكل حزمة. ثم تُباءر focused الذرات الموجودة في مستوى طاقي عال بوساطة حقول مغنطيسية لتوجيهها نحو حوجلة تخزين storage bulb خاصة محاطة بجوف cavity متجاوب قابل للموالفة.

وسوف تهبط بعض الذرات الموجودة في داخل الحوجلة إلى مستوى طاقي أخفض مطلقة فوتونات ذات تردد مكروي ، كما ستحث هذه الفوتونات ذرات أخرى لكي تهبط بدورها إلى مستوى طاقي أخفض، وهذا بدوره يحرره المزيد من الفوتونات المكروية. وبهذه الطريقة يتعاظم حقل الأمواج المكروية الذاتي الدعم في الحوجلة مشكلاً حقل الميزر. ويساعد الجوف الموالف المغلف للحوجلة على إعادة توجيه الفوتونات ثانية نحو المنظومة للمحافظة على عملية الإصدار المحثوث. ويتواصل الاهتزاز الميزري طالما استمر وصول الهيدروجين إلى المنظومة.

ويستطيع سلك على شكل حلقة مقفلة موضوعة داخل الجوف كشف الاهتزاز. إذ يحرض حقل الأمواج المكروية تياراً في السلك وهو يغذي بدوره سلسلة من الدارات في خارج الجوف، حيث تحول الدارات التيار المحرض إلى إشارة ذات تردد أخفض تقوم بتوليد النبضات الموقتة.

يبلغ تردد التجاوب في ميزر الهيدروجين نحو 1420 ميكاهرتز، وهو أصغر بكثير من تردد تجاوب السيزيوم. ولكن بما أن ذرات الهيدروجين تبقى في الحوجلة زمناً أطول من زمن بقاء السيزيوم في الحزمة فإن عرض تجاوب الميزر أضيق بكثير، وبالنتيجة يساوي عامل جودة Q معيار ميزر الهيدروجين نحو 10^{9} وهو يفوق عامل Q السيزيوم الذري بعشر مرات. إضافة إلى ذلك فلميزر الهيدروجين استقرار لا مثيل له، ويبلغ الخطأ ثانية واحدة كل 10^{15} ثانية (أي ثانية واحدة كل ثلاثين مليون سنة تقريباً).

ولسوء الحظ لا يستمر هذا الاستقرار أكثر من عدة أيام، ثم يهبط أداء ميزر الهيدروجين إلى مادون أداء حزم السيزيوم، حيث يتناقص الاستقرار بسبب التغيرات في تردد تجاوب الجوف. إذ تسبب تصادمات الذرات مع الحوجلة انزياح التردد بنحو جزء من 10^{11} من قيمة التردد.

وإحدى طرق التغلب على هذه المشكلة هي تشغيل الميزر في درجات حرارة منخفضة حيث يسمح هذا الشرط بخزن المزيد من الذرات (وهذا يعطي إشارة أقوى) كما يقلل من الضجيج

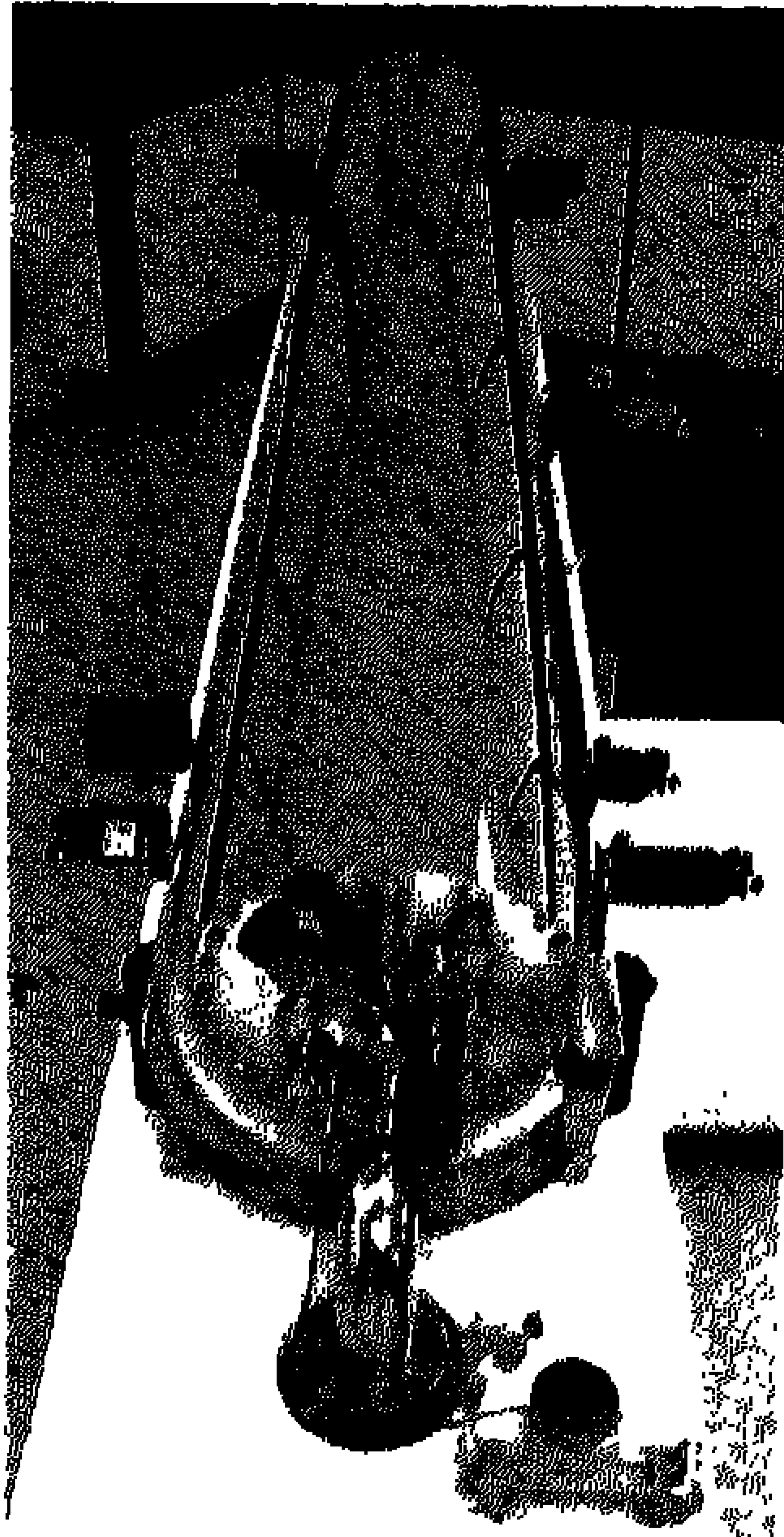
الإلكتروني، كما تحسن تغطية باطن الحوجلة بالهليوم السائل الفائق السيولة من الأداء. تشكل هذه المادة سطحاً جيداً ترتد عليه الذرات ارتداداً مرناً. وتستخدم اليوم طرق جديدة لتحسين استقرار الميزر، مثل استخدام مخالط تغطية أكثر فاعلية وطرق وتقانات للمؤازرة تبقي تجاوب الجوف متمركزاً حول التردد الذري.

وعلى الرغم من أن معيار التردد لحزمة السيزيوم الذرية هو الأكثر دقة على المدى الطويل فقد أشار عدد من الكشوف العلمية إلى إمكانية صنع ميقات أدق من ذلك. ويعتمد أحد أهم هذه الكشوف الواعدة على تردد تجاوب الجسيمات المأسورة (الملتقطة) والمشحونة كهربائياً، إذ يمكن تعليق الشوارد في الفراغ بحيث تبقى معزولة تماماً تقريباً عن تأثير أي اضطراب. وتبقى الشوارد نفسها مفصولة بشكل جيد عن بعضها لأنها تحمل الشحنة الكهربائية نفسها، وبالتالي فهي لا تعاني الاصطدامات مع الجسيمات الأخرى أو مع جدران الوعاء. كما يمكن أسر الشوارد لمدة طويلة تبلغ أحياناً عدة أيام.

وتستعمل طريقتان مختلفتان للمصيدة، في **مصيدة بنينك** Penning يمسك بالشوارد تركيب من الحقول الكهربائية الساكنة وغير المتجانسة مع حقل مغنطيسي متجانس، وفي مصيدة الأمواج المكروية (وتدعى عادة مصيدة بول Paul) يؤدي حقل كهربائي مهتز غير متجانس الغرض نفسه. ولكل من الطريقتين قصوراته المميزة، إذ يمكن للحقول المغنطيسية القوية في مصايد بنينك أن تؤدي إلى اضطراب تردد التجاوب، وفي مصايد بول يمكن أن يسبب الحقل الكهربائي انزياحات دوبلرية ناتجة من تسخين الشوارد وتسريعها. ويعتمد اختيار نوع المصيدة المستعملة على مناسبتها لعمل تجريبي معين.

وقد صنع العاملون في شركة هيولت ــ بكارد ومخبر الدفع النفاث (في باسادنا بولاية كاليفورنيا، وفي أمكنة أخرى من العالم)، أجهزة معايير تجريبية مستعملين مصايد بول. وكانت الجسيمات المصيدة هي شوارد الزئبق 199. وقد اختيرت هذه الشاردة لأن لها أكبر قيمة لتردد التجاوب الفائق الدقة (40.5 كيكاهرتز) من بين كل الذرات المناسبة لطريقة أسرها. وتلتقط عدة ملايين من هذه الشوارد في الحقول الكهربائية المولدة بين المساري، ثم تضخ الذرات بوساطة إشعاع فوق بنفسجي عن طريق مصباح خاص. وتشابه العملية اللاحقة عمليات المعايير المضخوخة ضوئياً، ولكن عوامل جودة Qs معايير الشوارد المصيدة أكبر من 10^{12}. وهذه القيمة هي أكبر بعشرة آلاف مرة من القيم التي تعطيها ميقات حزمة السيزيوم الحالية، ثم إن استقرارها على المدى القصير جيد على الرغم من عدم وصوله إلى درجة استقرار ميزرات الهيدروجين؛ إذ يحد انزياح دوبلر من المرتبة الثانية من تكراريتها إلى نحو ثانية واحدة في 10^{13} ثانية (أي في نحو مليون سنة).

ويمكن إنقاص انزياحات دوبلر بقدر كبير باستعمال **التبريد الليزري** laser cooling وقد اقترح هذه الطريقة في عام 1975 لأول



تبين الصورة ميقاتاً ضوئياً يستخدم ذرات السيزيوم في المعهد الوطني للمعايير والتقانات ويدعى NIST-7، وهو الذي يعطي التوقيت الرسمي للولايات المتحدة.

مرة كل من د.ج. واينلاند، الذي يعمل حالياً في المعهد الوطني للمعايير والتقانات وهـ.ج. دهملت من جامعة واشنطن وث.و. هنش، الذي يعمل الآن في جامعة ميونخ، وأ.ل. شولو من جامعة ستانفورد وتعتمد فكرة هذه الطريقة على استعمال حزمة من ضوء الليزر لإبطاء الشوارد، فعندما توجه الجسيمات بعكس اتجاه حزمة الليزر فإنها تمتص بعضاً من الزخم momentum لفوتون الليزر، ونتيجة لذلك تتباطأ الجسيمات. ولكي نعوض من انزياح دوبلر عند تحرك الجسيم من اتجاه معاكس لحزمة الليزر فإننا نوالف الحزمة على تردد أصغر بقليل من تردد تجاوب الشاردة.

ويطور الكثير من المخابر معايير تردد معتمدة على شوارد مبردة بوساطة الليزر وموضوعة من المصايد. فقد صنع معيار معتمد على شوارد البريليوم 9 beryllium المبردة بالليزر في مصيدة بنينك، وقد حد من تكراريتها (البالغة نحو ثانية واحدة في 10^{13} ثانية) وجود تصادمات الشوارد بالجسيمات المحايدة. وتزيد التحسينات على نوعية التخلية بشكل محسوس من قيمة التكرارية، لأن انزياح دوبلر من الرتبة الثانية لا يشكل عاملاً مقيداً هنا، فهو يساوي نحو جزء من 10^{15} فقط.

وقد حدثت تطورات مثيرة في أسر وتبريد الذرات المحايدة خلال السنوات القليلة الماضية، وهذا ما كان صعب التحقيق مقارنة بأسر وتبريد الشوارد. وبشكل خاص ينتج التبريد الليزري الفاعل من استعمال ثلاثة أزواج من الحزم الليزرية المبردة التي تنتشر في اتجاهات متعاكسة على طول ثلاثة محاور متعامدة فيما بينها. وهكذا تبطئ الذرة المتحركة أياً كان اتجاهها ، ويعطي هذا المفعول

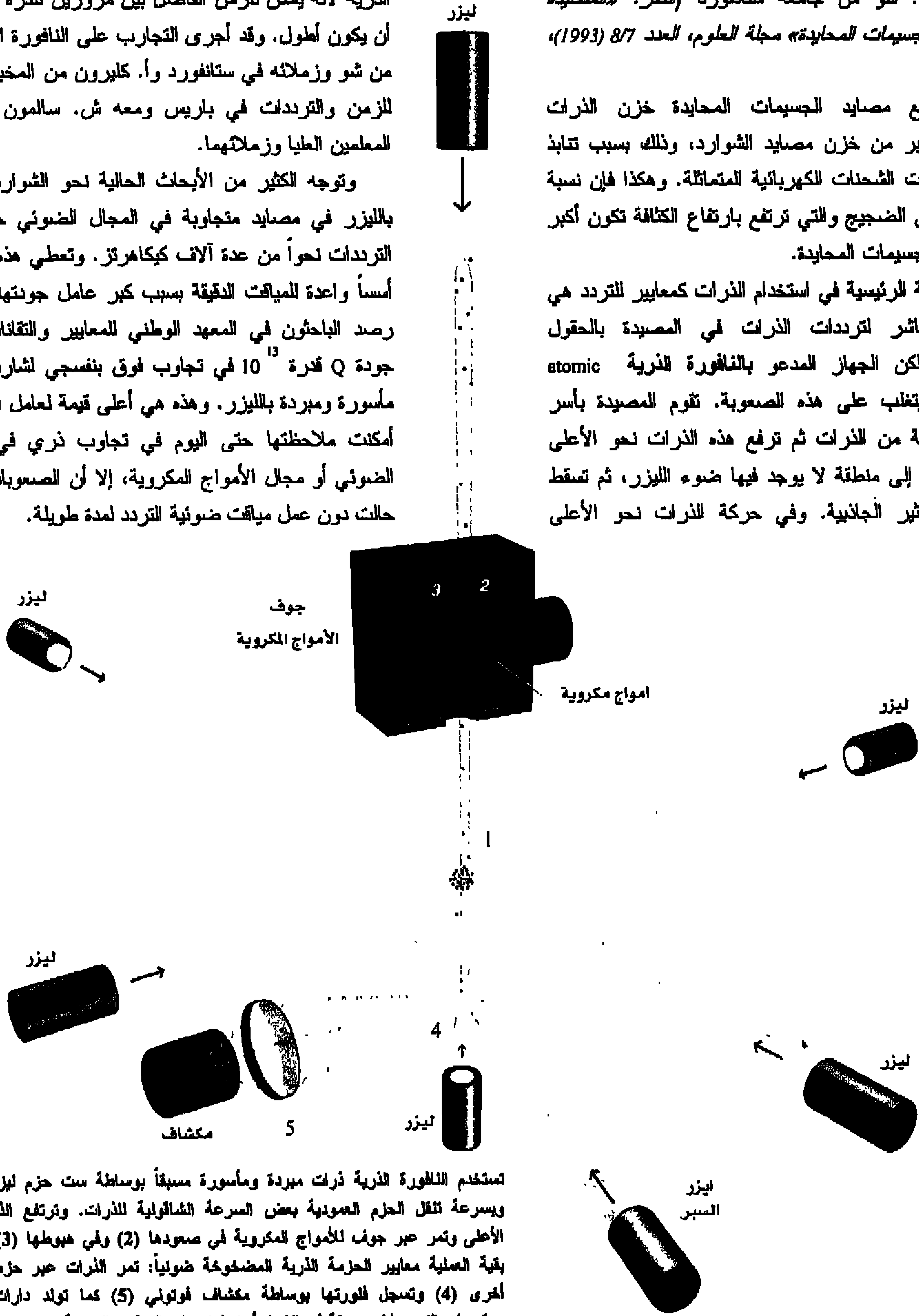
ما يسمى بالمولاس الضوئي optical molasses. وقد أسهم باحثون عديدون في هذا المجال نذكر منهم: و.د. فيليبس من المعهد الوطني للمعايير والتقانات في كايترسبورك بولاية مريلاند وس. كوهن تانوجي وج. داليبار من دار المعلمين العليا وس. شو من جامعة ستانفورد (*انظر: «المصيدة الليزرية للجسيمات المحايدة» مجلة العلوم، العدد 8/7 (1993)، ص 33*).

تستطيع مصايد الجسيمات المحايدة خزن الذرات بكثافات أكبر من خزن مصايد الشوارد، وذلك بسبب تنابذ الشوارد ذات الشحنات الكهربائية المتماثلة. وهكذا فإن نسبة الإشارة إلى الضجيج والتي ترتفع بارتفاع الكثافة تكون أكبر في حالة الجسيمات المحايدة.

والعقبة الرئيسية في استخدام الذرات كمعايير للتردد هي التأثر المباشر لترددات الذرات في المصيدة بالحقول الليزرية. لكن الجهاز المدعو بالنافورة الذرية atomic fountain يتغلب على هذه الصعوبة. تقوم المصيدة بأسر وتبريد عينة من الذرات ثم ترفع هذه الذرات نحو الأعلى حتى تصل إلى منطقة لا يوجد فيها ضوء الليزر، ثم تسقط الذرات بتأثير الجاذبية. وفي حركة الذرات نحو الأعلى والأسفل تمر الذرات في حقل مهتز. وبهذه الطريقة تحث انتقالات التجاوب فقط عندما تكون الذرات في جهاز حزمة الحقل الهزاز المنفصل.

يكون عامل جودة Q هذا الجهاز أعلى من الحزمة الذرية لأنه يمكن للزمن الفاصل بين مرورين للذرة في داخله أن يكون أطول. وقد أجرى التجارب على النافورة الذرية كل من شو وزملائه في ستانفورد وأ. كليرون من المخبر الأولي للزمن والترددات في باريس ومعه ش. سالمون من دار المعلمين العليا وزملائهما.

وتوجه الكثير من الأبحاث الحالية نحو الشوارد المبردة بالليزر في مصايد متجاوبة في المجال الضوئي حيث تبلغ الترددات نحواً من عدة آلاف كيكاهرتز. وتعطي هذه المعايير أسساً واعدة للميقاتات الدقيقة بسبب كبر عامل جودتها Q. وقد رصد الباحثون في المعهد الوطني للمعايير والتقانات عامل جودة Q قدرة 10^{13} في تجاوب فوق بنفسجي لشاردة وحيدة مأسورة ومبردة بالليزر. وهذه هي أعلى قيمة لعامل الجودة Q أمكنت ملاحظتها حتى اليوم في تجاوب ذري في المجال الضوئي أو مجال الأمواج المكروية، إلا أن الصعوبات التقنية حالت دون عمل ميقاتات ضوئية التردد لمدة طويلة.



تستخدم النافورة الذرية ذرات مبردة ومأسورة مسبقاً بوساطة ست حزم ليزرية (1). وبسرعة تنقل الحزم العمودية بعض السرعة الشاقولية للذرات. وترتفع الذرات نحو الأعلى وتمر عبر جوف للأمواج المكروية في صعودها (2) وفي هبوطها (3). وتشابه بقية العملية معايير الحزمة الذرية المضخوخة ضوئياً: تمر الذرات عبر حزمة ليزرية أخرى (4) وتسجل فلورتها بوساطة مكشاف فوتوني (5) كما تولد دارات مؤازرة ومقسمات التردد (غير مبينة في الشكل أعلاه) نبضات التوقيت الدورية.

وقد يعطي تنوع معايير التردد العالية الأداء، التي توجد اليوم، الانطباع بعدم الحاجة إلى أجهزة مستقبلية أكثر جودة. فالمياقت الذرية الحالية دقيقة جداً إلى درجة أنها أعادت تعريف بعض وحداتنا الأساسية. وكما ذكرنا سابقاً تعرف الثانية على أساس تردد تجاوب ذرة السيزيوم، كما تم اتفاق عالمي يعرف المتر بأنه المسافة التي يقطعها الضوء في 1/299792458 من الثانية، ويعرف الفلط بأنه التردد المميز لتيار متناوب يمر بين قطعتين معدنيتين فائقتي الموصلية فيما يدعى بوصلة جوزفسون josephson junction

ومع هذا فإن تطبيقات شتى تحتاج إلى مياقت أفضل أداء من المياقت الحالية، وعلم الفلك الراديوي هو مثال جيد. إذ غالباً ما يستعمل علماء الفلك عدة مقاريب telescopes متباعدة آلاف الكيلومترات عن بعضها لدراسة نجم معين، وهي طريقة تزيد الميز (الفصل) resolution بقدر مثير (انظر:

«Radio Astronomy by Very Long- Baseline Interferometry», by A. C. S. Redhead, Scientific American, June 1982.)

فعند وضع مقرابين راديويين يبعد أحدهما عن الآخر مسافة 10000 كيلومتر يكون لهما ميز زاوي فعلي أفضل بمليون مرة من أي واحد منهما على انفراد. ولكن مقارنة معطيات المقرابين بشكل مجدي تقتضي معرفة لحظة تلقي المقراب للإشارة بدقة عالية. ولميزرات الهيدروجين في الوقت الراهن الاستقرار الكافي لهذه الأرصاد، لكننا ربما سنحتاج إلى مياقت أدق في المقاريب الراديوية المحمولة في الفضاء.

كما نحتاج إلى المياقت الفائقة الاستقرار من أجل فحص الظواهر النسبية. فقياسات توقيت النجوم النباضة التي تكون أدوار إشعاعها من مرتبة المليثانية والتي يكون بعضها مستقراً مثل أفضل المياقت الذرية قد تعطي الدليل على وجود أمواج الثقالة. ففي عام 1978 وجد ج.هـ. تايلور (ومساعدوه من جامعة برينستون) أن دور منظومات النجوم النباضة الثنائية قد تغير بقدر بطيء وبالقيمة المنتظرة لفقدان الطاقة عن طريق الإشعاع التثاقلي، مما يتفق مع تنبؤات نظرية النسبية العامة. ويمكن تحقيق دقة أكبر إذا تم أخذ القياسات خلال عدة سنوات، ولهذا فستكون المياقت ذات الاستقرار العالي على المدى الطويل مفيدة فعلاً.

وفي اختبارات النسبية الأخرى أكد فسوت وزملاؤه الزيادة المتوقعة في معدلات تسارع الميقت عند الارتفاعات العالية، فقد أرسلوا ميزر هيدروجين على متن صاروخ وقاسوا الانزياح النسبي الصغري للميقت بدقة تصل إلى 0.007 في المئة على ارتفاع 10000 كيلو متر. وقد استخدمت المياقت الفائقة الاستقرار من قبل إ.إ. شابيرو الذي يعمل حالياً في مركز هارفارد ـــ سميثسونيان للفيزياء الفلكية لرصد التأخر النسبي للإشارة الضوئية المارة قرب الشمس.

وللضبط الفائق للوقت تطبيقات عملية جداً وبخاصة في مجال الملاحة، فمثلاً تم تعيين موضع المركبة الفضائية فويجر Voyager 2 قرب الكوكب نبتون بوساطة تعيين بعدها عن ثلاثة مقاريب رادارية تفصلها عن بعضها مسافة كبيرة جداً. وقد عين بعدها عن كل مقراب بوساطة القياسات الدقيقة للزمن الذي يأخذه الضوء ذهاباً وإياباً إلى المقراب (ثماني ساعات تقريباً).



التوقيت العالمي

نقدم في هذا المقال مسألة قياس فاصل زمني مثل الثانية أو الدقيقة. لا تتطلب هذه العملية أكثر من ميقت جيد، ولكن لكي نستطيع القول بأن حادثة وقعت في وقت معين ولنقل في الثانية 22 بعد الساعة 12:31 من ظهر يوم 1993/7/5 يجب علينا عمل مزامنة مع ميقت متفق عليه كمعيار مشترك. يحدد « الميقت المعياري» الدولي نظرياً من القيمة الوسطى لأفضل مياقت العالم. وتقع مسؤولية تنسيق الوقت العالمي على المكتب العالمي للأوزان والمقاييس International Bureau Of Weights and Measures الموجود في مدينة سفر بفرنسا. ويدعى هذا المقياس الزمني المتسق بالوقت الذري العالمي International Atomic Time أو (TAI).

يستخدم الكثيرون المقياس الزمني الذي يأخذ بالاعتبار دوران الأرض. وهذا يعني أنه يجب أخذ طول اليوم عندما تكون الشمس في أوجها عند الظهر في مدينة كرينتش بإنكلترا وذلك على امتداد سنة، ثم تؤخذ القيمة الوسطية للنتائج. لكن مدة اليوم المحددة اعتماداً على الموضع الظاهري للشمس ليست ثابتة. وهي تزيد بشكل عام عن الأربع والعشرين ساعة المعرفة حسب الزمن الذري العالمي. ولكي نعوض عن هذه الفروق نعرف مقياساً زمنياً آخر يدعى الوقت التنسيقي الشامل Coordinated Universal Time أو (UTC) بجمع أو طرح عدد صحيح من الثواني من الزمن الذري العالمي. وتزداد هذه الثواني أو تنقص في 12/31 أو في 6/30 للمحافظة على الزمن التنسيقي الشامل متوافقاً ضمن 0.9 ثانية مع زمن دوران الأرض حول نفسها، ويجب أخذ فرق الثواني بالحسبان من أجل تحديد الفرق بين زمنين معينين.

والملاحة على سطح الأرض مهمة أيضاً. وأحد آخر التطبيقات للميقاتيات هو تعيين الموضع بوساطة الأقمار الصنعية ويدعى المنظومة الشاملة لتعيين الموضع Global Positioning System (GPS) وتعتمد هذه المنظومة على ميقاتيات ذرية محمولة على متن الأقمار الصنعية المدارية. وهي تسمح لشخص مزود بجهاز راديو مستقبل وحاسوب بتحديد موضعه بخطأ يبلغ عشرة أمتار تقريباً، وتحديد الوقت الصحيح بدقة تصل إلى 10^{-7} ثانية. كما يمكن لراصدين لقمر صنعي مزود بميقاتية ذرية مزامنة ميقاتيتيهما، بدقة تصل إلى عدة أجزاء من بليون من الثانية.

وينتظر أن تكون للمنظومة السابقة تطبيقات عملية واسعة الانتشار مثل تعيين مواضع السفن والطائرات والسيارات العادية. وقد استعملت هذه المنظومة خلال حرب الخليج عام 1991 من أجل السماح للوحدات العسكرية بتعيين مواضعها في الصحراء، كما يمكن اليوم شراء مستقبلات تجارية بأقل من 1000 دولار أمريكي، مع العلم أن دقة هذه النسخ المدنية محددة بنحو 100 متر بسبب التشويش المتعمد للإشارات المبثوثة من الأقمار الصنعية. وستعطي مجموعة متنامة من 24 قمراً تغطية عالية على مدى 24 ساعة، وهذه المنظومة هي شبه مكتملة حالياً.

تبين هذه التطبيقات وغيرها أهمية معايير الوقت والتردد. وستزيد التحسينات المتوقعة لهذه المعايير من فاعلية الاستعمالات الحالية وستفتح الطريق لوظائف جديدة. وسينبئنا الزمن عن ماهية هذه الوظائف!



المؤلفان

Wayne M. Itano – Norman F. Ramsay

تعاونا مرات عديدة قبل كتابة هذا المقال. حصل إيتانو على الدكتوراه من جامعة هارفارد تحت إشراف رامزي. وهو الآن فيزيائي في قسم الوقت والتردد في المعهد الوطني للمعايير والتقانات في بولدر بكولورادو حيث تتركز أبحاثه حول أسر وتبريد الشوارد (الأيونات)، كما يقود تجارب مبتكرة في الميكانيك الكمومي. وهو أيضاً هاو لدراسة المستحاثات وجامع لها. أما رامزي فهو أستاذ الفيزياء في جامعة هارفارد. حصل على الدكتوراه في جامعة كولومبيا. كما حاز على شهادات في جامعتي أكسفورد وكامبردج إضافة إلى العديد من الشهادات الفخرية. تلقى رامزي الكثير من الجوائز والمكافآت إلى أن وصل إلى أعلى مراتب الشرف في عام 1989 عندما حاز على جائزة نوبل في الفيزياء بالمشاركة، عن عمله في طريقة الحقل الهزاز المنفصل وفي ميزر الهيدروجين الذري.

مراجع للاستزادة

For Sundials To Atomic Clocks: Understanding Time And Frequency. J. Jespersen And J. Fitz-Randolph. Dover, 1982.

History Of Atomic Clocks. N.F. Ramsey In *Journal Of Research Of The National Bureau Of Standards*, Vol. 88, No. 5, Pages 301-320; September/October 1983. Precise Measurement Of Time. N. F. Ramsey In *American Scientist*, Vol. 76, No. 1, Pages 42-49; January/February 1988.

Time And Frequency. Special Issue Of *Proceedings Of The IEEE*, Vol. 79, No. 7; July 1991.

الحواسيب المصممة على أسس ميكانيك الكم

إذا أمكن بناء حواسيب مصمَّمة على أسس ميكانيك الكم، فإنها تستطيع أن تؤدي مهام تتعذر على أي حاسوب عادي

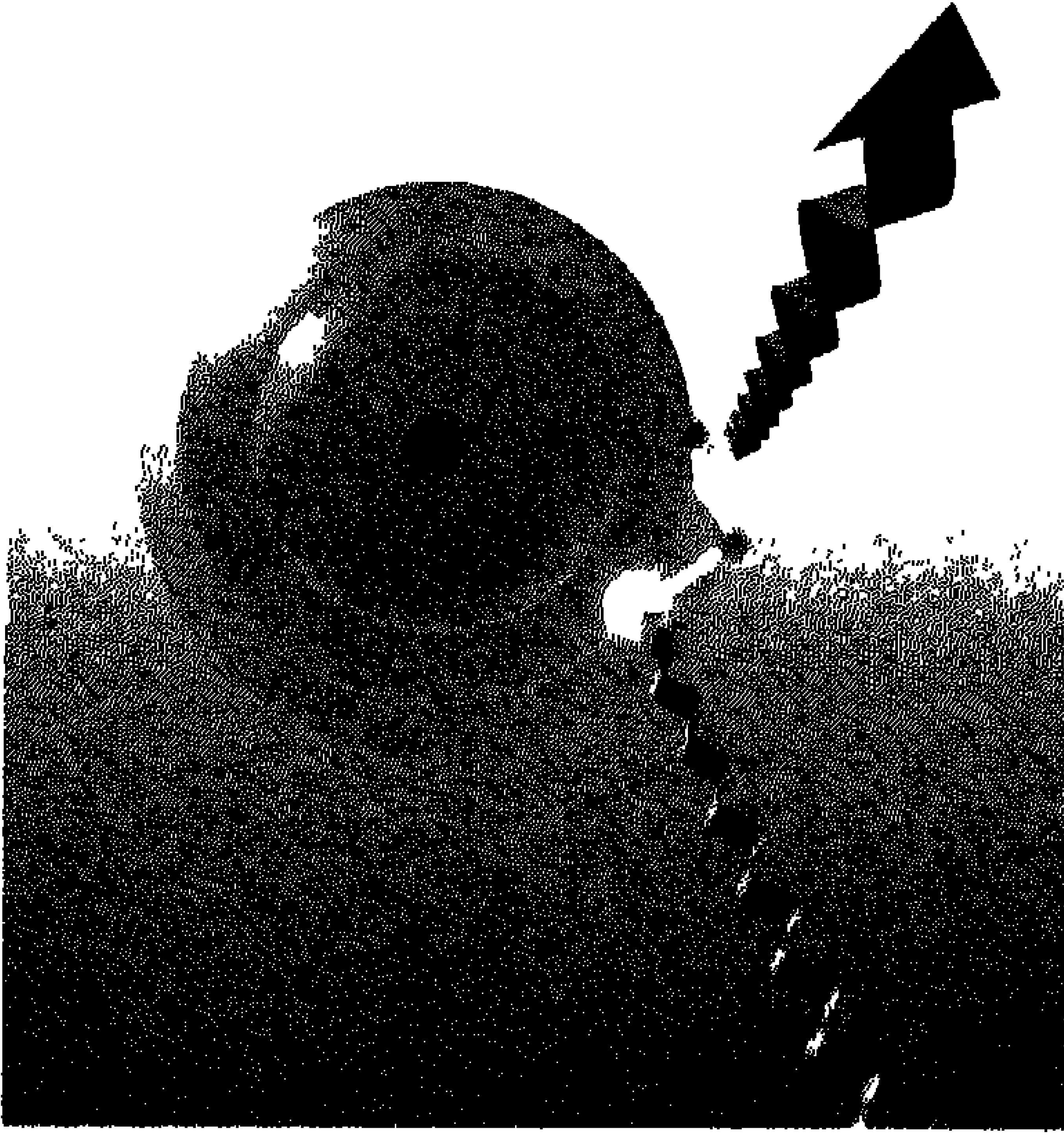
(س. لويد)

خلال الخمسين عاماً الماضية، كانت سرعة الحواسيب تزداد بمقدار الضعف كل عامين في حين كان حجم مكوناتها يتناقص إلى النصف في كل من هذه الفترات. تحتوي الدارات (الدوائر) الآن على اسلاك وترانزستورات ذات أبعاد تقارب الواحد في المئة فقط من سمك شعرة بشرية واحدة. وبسبب هذا التقدم الهائل المتعاقب، أصبحت أجهزة اليوم أقوى بملايين المرات من أسلافها البدائية. ولكن الفورات تخمد عادة بمرور الزمن، وقد وصلت تقانة الدارات المتكاملة إلى أقصى حدودها تقريباً.

يمكن بالوسائل التقنية المتقدمة في الطباعة الليثوغرافية، الحصول على أجزاء للدارات الإلكترونية أصغر من تلك المتاحة حالياً بمئة مرة. ولكن بهذا المقياس، حيث تظهر المادة على هيئة تجمع من الذرات المنفردة، تعمل الدارات المتكاملة بصعوبة. وإذا وصلنا إلى مرحلة إنقاص حيز المكونات إلى العشر من ذلك، فإن الذرات تتصرف عندها باستقلالية كاملة، وفي هذه الحالة يمكن لخلل واحد أن يؤدي إلى الفوضى التامة. وعلى ذلك، إذا كانت الحواسيب ستصبح في المستقبل أصغر كثيراً من حجمها الحالي، فإن التقانة الحالية يجب أن تستبدل أو تدعم بأخرى جديدة.

ومنذ عدة عقود، بدأ جيل الرواد من أمثال (ر. لانداور) و(ش.هـ. بنيت) (يعملان في مركز بحوث «ت.ج. واطسون» التابع للشركة IBM) البحث في فيزياء دارات معالجة المعلومات، وأخذا يطرحان الأسئلة حول ما ستقود إليه (نمنمة) Miniaturization هذه الدارات. إلى أي مدى يمكن أن نصل في تصغير مركبات هذه الدارات؟ ما كمية الطاقة التي يجب استخدامها عند إجراء الحسابات؟ ولأن الحواسيب هي أدوات «نبائط» Devices فيزيائية فإن الفيزياء تحكم أداءها الأساسي، وإحدى الحقائق الفيزيائية في الحياة هي أنه عندما تصبح مركبات دارات الحاسوب صغيرة جداً فإن ميكانيك الكم هو الذي يجب أن يحدد مواصفاتها.

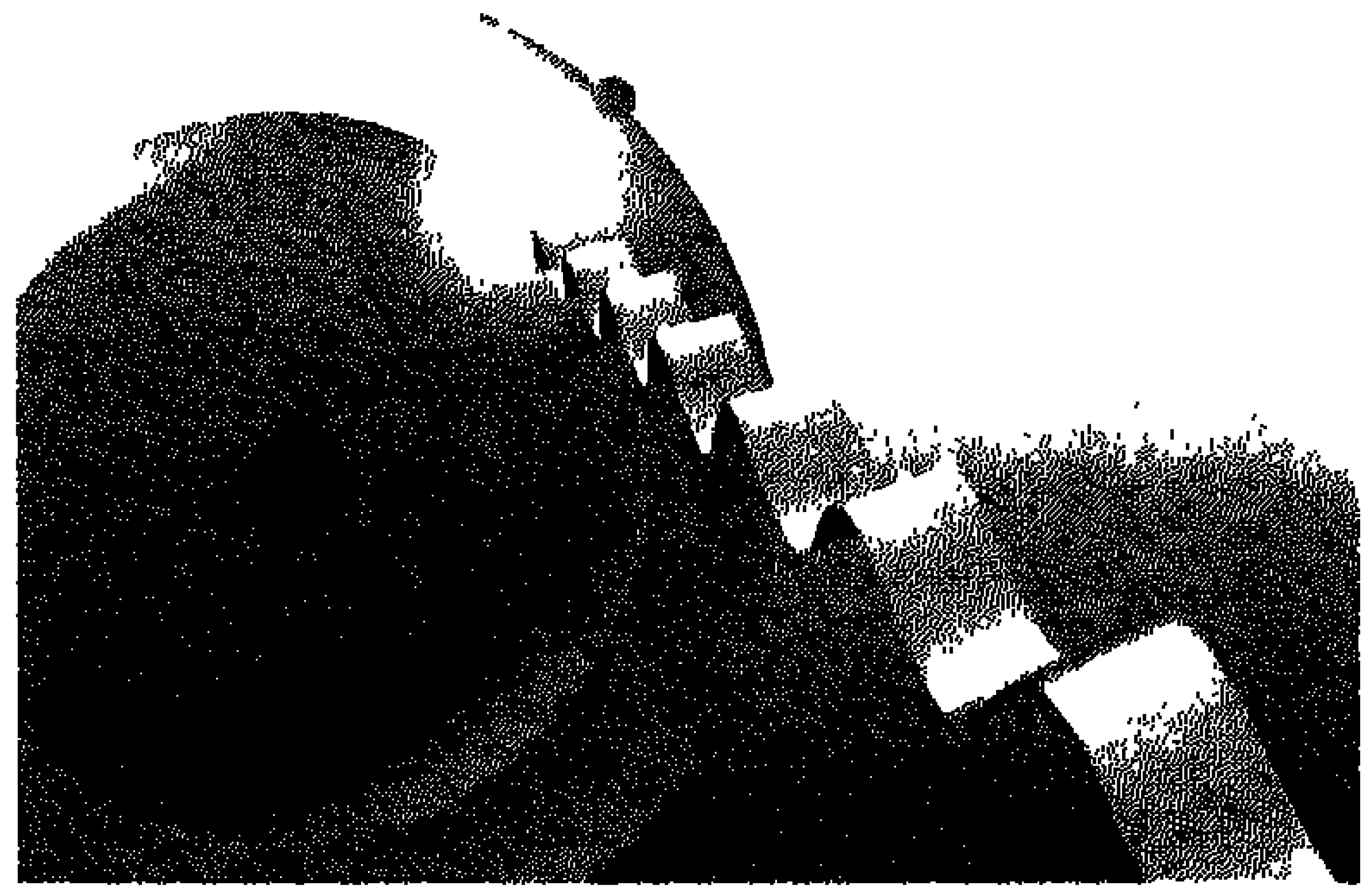
في بداية الثمانينيات من هذا القرن، استخدم (ب. بنيوف) الذي كان يعمل في مختبر أركون الوطني، النتائج التي حصل عليها لانداور وبنيت من قبل لإثبات أن الحاسوب يمكن، من ناحية المبدأ، أن يعمل بأسلوب ميكانيك الكم فقط. وبعد ذلك بفترة قصيرة،



يمكن قراءة البتة التي تخزنها ذرة ما باستخدام نبضة ليزرية طاقتها تساوي بالضبط الفرق بين حالة الذرة المثارة ويمكن تسميتها E_1 وحالة أخرى أكثر علواً وأقل استقراراً يمكن تسميتها E_2. إذا كانت الذرة في حالتها الأساسية الساكنة تمثل 0 فإن هذه النبضة لن يكون لها أي تأثير. أما إذا كانت في الحالة E_1 وتمثل 1، فإن النبضة سترفعها إلى E_2 وبعد ذلك تعود الذرة إلى E_1 وتبث فوتوناً كاشفاً.

بدأ (د. دويتش) (من معهد الرياضيات بجامعة أكسفورد) وعلماء آخرون في الولايات المتحدة الأمريكية وإسرائيل في بناء نماذج للحواسيب المصمَّمة على أسس ميكانيك الكم، وذلك للكشف عن كنه الاختلاف بينها وبين الحواسيب التقليدية. وعلى الخصوص، فإنهم تساءلوا عن إمكانية استغلال تأثيرات ميكانيك الكم للتسريع في إجراء الحسابات، وعن إمكانية إجراء الحسابات بطرق مستحدثة.

فترت همة البحث في هذا المجال، في منتصف عقد الثمانينيات، لأسباب متعددة. أولها أن جميع هؤلاء الباحثين كانوا يعالجون موضوع الحواسيب المبنية على أسس ميكانيك الكم بأسلوب تجريدي بدلاً من دراسة أنظمة فيزيائية واقعية —



يمكن استخدام ذرات الهيدروجين لتخزين بتات المعلومات في حاسوب كمومي. يمكن لذرة في حالتها الأساسية الساكنة، حيث يكون إلكترونها عند أدنى مستوى ممكن لطاقته (الأزرق) أن تمثل 0، والذرة نفسها وهي في حالة مثارة حيث يكون إلكترونها في مستوى طاقة أعلى (الأخضر) يمكن أن تمثل 1. إن البتة الخاصة بالذرة، 0 أو 1، يمكن أن تنقلب للقيمة المقابلة باستخدام نبضة ضوء ليزري (الأصفر). إذا كانت طاقة الفوتونات في النبضة تساوي الفرق بين الحالة المثارة والحالة الأساسية الساكنة للإلكترون، فإن الإلكترون سيقفز من إحدى الحالتين إلى الأخرى.

وهو اتجاه دَحَضه لانداور بحجج متعددة. وأصبح من الواضح أيضاً أن الحاسوب المبني على أسس ميكانيك الكم قد يتعرض للأعطال التي من الصعب تصحيحها. وباستثناء اقتراح واحد للعالم (ر.ب. فينمان) (من معهد كاليفورنيا للتقانة، الذي رأى أن الحواسيب الكمومية قد تفيد في نمذجة الأنظمة الكمومية الأخرى ـــ مثل المادة الجديدة أو غير المرئية) لم يكن من الواضح أن هذه الحواسيب ستكون أسرع من الحواسيب التقليدية في حل المسائل الرياضياتية.

تغيرت هذه الصورة في السنوات الثلاث الماضية. فقد وصف كاتب المقال في عام 1993 صفاً واسعاً من النظم الفيزيائية المعهودة التي يمكن أن تعمل كحواسيب كمومية بطرق تتجنب بعض اعتراضات لانداور. وقد أوضح (ب.و. شور) من مختبرات بل التابعة للشركة AT&T إمكانية استخدام الحاسوب الكمومي لتحليل الأعداد الكبيرة إلى عواملها الأولية، وهي مهمة يمكن أن تتعذر على أقوى الحواسيب التقليدية. وفي عام 1994، أنتجت ورش العمل في معهد التبادل العلمي بتورينو الإيطالية تصميمات متعددة لبناء الدارات الكمومية. ومنذ فترة قريبة، قامت المجموعة البحثية في معهد كاليفورنيا للتقانة بإشراف (هـــ.ج. كيمبل) والفريق البحثي في المعهد القومي للمعايير والتقانة ببناء بعض النماذج الأولية لبعض المكونات. ويوضح هذا المقال الكيفية التي يمكن بها تجميع الحواسيب الكمومية، ويصف بعض الأمور المذهلة التي يمكن أن تقوم بها والتي تعجز الحواسيب الرقمية عن أدائها.

ميكانيك الكم

يجب أن نواجه الواقع ونعترف بأن ميكانيك الكم هو علم غريب. يقول الفيزيائي الدنماركي (ن. بور) الذي ساعد على اكتشاف هذا المجال «إن أي شخص يتمكن من دراسة ميكانيك الكم ولا يصيبه الدوار هو شخص لم يفهم هذا العلم فهماً صحيحاً». وسواء كان هذا أمراً طيباً أم سيئاً، فإن ميكانيك الكم يتنبأ بعدد من التأثيرات المخالفة لما يمكن التوصل إليه عن طريق الحدس، وهي تأثيرات تم التحقق من وجودها تجريبياً مرات عديدة. ولتقدير درجة الخروج عن المألوف التي يمكن أن تصل إليها الحواسيب الكمومية، يكفي فقط أن نتقبل حقيقة غريبة واحدة تسمى **مثنوية «ثنائية» الموجة والجسيم Wave-Particle Duality**.

تعني مثنوية الموجة والجسيم أن الأشياء التي نعتبرها عادة جسيمات صلبة، مثل كرات السلة والذرات، تسلك في حالات معينة سلوك الأمواج، وأن الأشياء التي نَصِفُها عادة بالأمواج، مثل الصوت والضوء، تسلك أحياناً سلوك الجسيمات. وجوهر نظرية ميكانيك الكم أنها تحدد الأنواع المعينة من الأمواج التي ترتبط بأنواع معينة من الجسيمات.

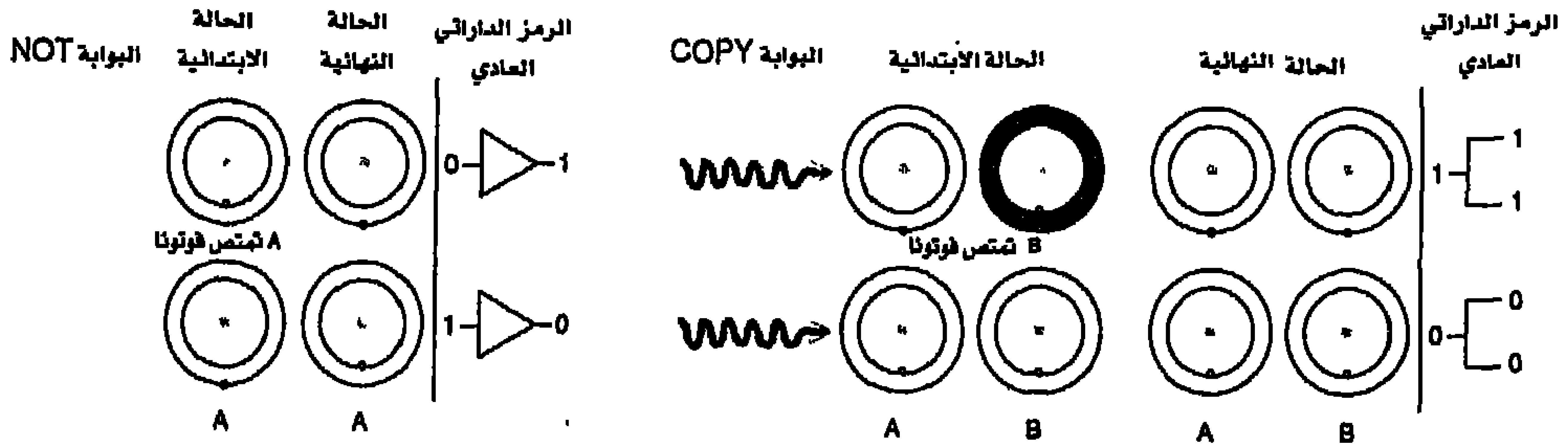
وأول تضمين غريب لمثنوية الموجة والجسيم هو أن المنظومات الصغيرة، كالذرات مثلاً، لا يمكن أن توجد إلا في حالات طاقة منفردة. وبالتالي، فعندما تنتقل ذرة من حالة طاقة معينة إلى حالة أخرى، فإنها تمتص الطاقة وتبعثها بكميات متساوية. ويطلق على مقادير الطاقة هذه اسم الفوتونات. ويمكن اعتبار الفوتونات بأنها الجسيمات التي تتشكل منها موجات الضوء.

والنتيجة الأخرى هي أن الموجات في ميكانيك الكم، مثلها مثل الموجات المائية، يمكن تراكبها معاً (أي إضافة بعضها إلى بعض). تعطينا هذه الموجات عند دراستها منفردة (أي كل واحدة منها على حدة) وصفاً تقريبياً لموضع جسيم معين. أما إذا ربطنا بين اثنتين أو أكثر من هذه الموجات فإن موضع الجسيم يصبح غير واضح. أي إنه طبقاً لمفهوم كمومي غريب، يمكن لإلكترون ما أن يوجد في مكانين في الوقت نفسه. ويظل موضع مثل هذا الإلكترون غير معروف إلى أن يكشف أحد التفاعلات (مثل انطلاق فوتون من الإلكترون) عن موضعه في أحد المكانين ولكن ليس في كليهما.

عندما تسلك موجتان بعد تراكبهما سلوك الموجة الواحدة يقال إنهما مترابطتان، وتسمى عملية إعادة الهوية المنفصلة لموجتين مترابطتين عملية فك الارتباط. إذا وُجد إلكترون في تراكب لحالتي طاقة (أو، بعبارة تبسيطية، في موضعين مختلفين داخل ذرة)، يمكن أن يستغرق فك الارتباط وقتاً طويلاً. فمثلاً، يمكن أن تمضي أيام قبل أن يصطدم فوتون بشيء صغير كالإلكترون ويكشف بالتالي عن موضعه. مبدئياً، يمكن أيضاً لكرات السلة أن توجد هنا وهناك في الوقت نفسه (حتى في غياب اللاعب الموهوب مايكل جوردان). وفي الواقع، إن الوقت الذي يستغرقه فوتون في الارتداد من سطح كرة قصيرٌ إلى درجة أن ملاحظته تتعذر بالعين المجردة أو بأي جهاز آخر. والكرة، ببساطة، كبيرة إلى درجة يصعب معها عدم تحديد مكانها بالضبط لفترة زمنية محسوسة. وبالتالي فإن الأشياء الصغيرة والدقيقة هي فقط التي تبدي غرابة كمومية.

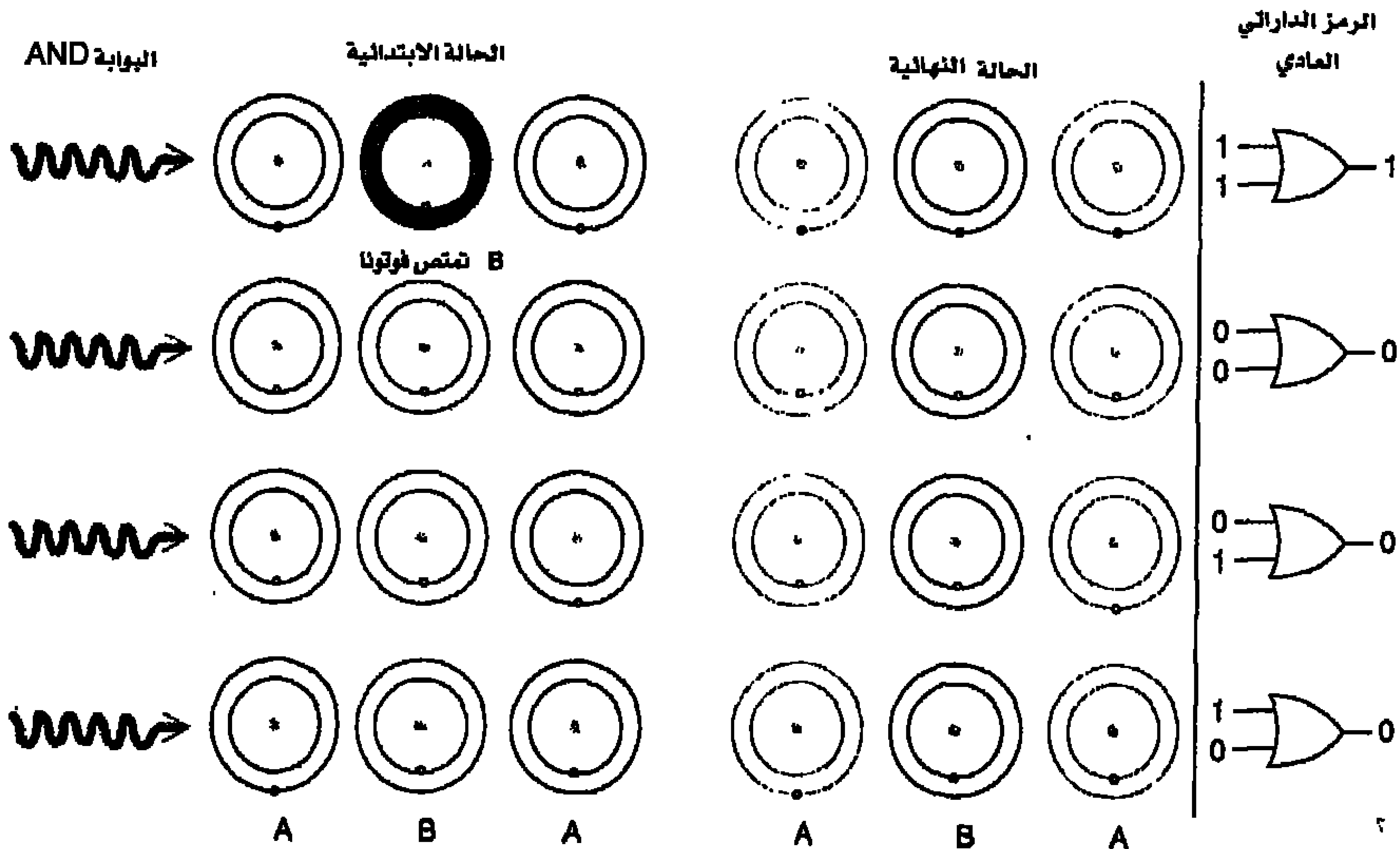
بوابات المنطق الكمومية

تعتبر بوابات المنطق وسائل لإجراء عمليات أولية على بتات المعلومات. وقد برهن عالم المنطق الأيرلندي (ج. بول Georgye Boole) في القرن التاسع عشر أن أي عمل منطقي أو حسابي معقد يمكن إنجازه باستخدام توافيق من ثلاث عمليات بسيطة: NOT وCOPY وAND. وفي الواقع، يمكن للذرات، أو أي منظومة كمومية أخرى، إجراء هذه العمليات.



في العالم الكمومي، تعتمد البوابة COPY على التفاعل المتبادل بين ذرتين مختلفتين. لنتخيل ذرة A تختزن 0 أو 1، وتقع بالقرب من ذرة أخرى B في حالتها الأساسية الساكنة. إن الفرق في الطاقة بين حالتي B يأخذ قيمة معينة إذا كانت A هي 0 وقيمة أخرى إذا كانت A هي 1. والآن لنر تأثير نبضة من الضوء طاقة فوتوناتها تساوي القيمة الأخيرة. إذا كانت شدة النبضة وفترة تأثيرها هما الشدة والفترة المطلوبتين، وكانت A هي 1، فإن B ستمتص فوتوناً وتنقلب (الصف الأعلى)، اما إذا كانت A هي 0 فسيتعذر على B أن تمتص فوتوناً من النبضة وستبقى دون تغيير (الصف الأسفل). وبالتالي فكمـا هـو موضح في اليمين، إذا كانت A هي 1 فإن B تصبح 1، وإذا كانت A هي 0 تظل B كما هي 0.

إن البوابة NOT لا تتضمن إلا عملية قلب البتات. إذا كانت A هي 0 تصبح 1 وبالعكس. وفي حالة الذرات، يمكن إجراء ذلك بإعطاء نبضة طاقتها تساوي الفرق بين الحالة الأساسية الساكنة لـ A (أي عندما يكون الإلكترون في أدنى مستوى طاقة له والموضح بالحلقة الداخلية) وبين حالتها المثارة (الموضحة بالحلقة الخارجية). وعلى خلاف البوابات NOT التقليدية، يمكن للبوابات NOT الكمومية أن تقلب البتات إلى نصف المدى فقط.



تعتمد البوابة AND أيضاً على التفاعلات الذرية. لنتخيل ثلاث ذرات A وB وA موجودة بجانب بعضها. إن الفرق في الطاقة بين الحالتين الأساسية الساكنة والمثارة لـB هو دالة متغيرة بتغير حالتي الذرتين A. لنفترض أن B هي في حالتها الأساسية الساكنة ونطلق نبضة ذات طاقة تساوي الفرق بين حالتي B عندما تكون كلتا الذرتين A المجاورتين هما في الحالة 1. في هذه الحالة ستقلب النبضة الذرة B (الصف العلوي)، وفيما عدا ذلك ستترك النبضة الذرة B دون تغيير (جميع الصفوف الأخرى).

المعلومات الكمومية

تأتي المعلومات بصورة متقطعة كحزم متتابعة، مثلها في ذلك مثل مستويات الطاقة الذرية في ميكانيك الكم. وكمُّ المعلومات هو (البتة) bit. إن البتة من المعلومات هي تمييز بسيط بين بديلين: نعم أو لا، 0 أو 1، خطأ أو صواب. وفي الحواسيب الرقمية، تمثل الفلطية بين لوحي مكثف بتة من المعلومات. يسجل المكثف المشحون 1 في حين يسجل المكثف غير المشحون 0. ويعمل الحاسوب الكمومي عن طريق الملاءمة بين الصفة الانفرادية المألوفة في معالجة المعلومات الرقمية وبين الصفة المتقطعة الغريبة لميكانيك الكم.

وفعلاً، يمكن لصف من ذرات الهيدروجين أن يحمل بتات مثلما يفعل صف من المكثفات. ويمكن أن تُكوِّد ذرة في حالتها الإلكترونية الأساسية الساكنة بالرقم 0 وفي حالتها المثارة بالرقم 1. ومع ذلك، فلكي يعمل أي نظام كمومي مثل هذا كحاسوب، يجب أن يؤدي أكثر من مجرد تخزين البتات. يجب أن يتمكن المشغل من تحميل النظام بالمعلومات وأن يعالج هذه المعلومات بعمليات منطقية بسيطة وأن يستخرجها. وبعبارة أخرى، يجب أن تكون الأنظمة الكمومية قادرة على القراءة والكتابة وعلى إجراء العمليات الحسابية.

كان (إ.إ. رابي) (الذي فاز بجائزة نوبل للفيزياء عام 1944) أول من أوضح كيفية كتابة المعلومات على منظومة كمومية. وتعمل طريقته عند تطبيقها على ذرات الهيدروجين كالتالي: نتخيل ذرة هيدروجين في حالتها الأساسية الساكنة ولها طاقة E_0. لكتابة 0 بتة على هذه الذرة لا نفعل شيئاً على الإطلاق. ولكتابة 1 بتة تثار الذرة إلى مستوى طاقة أعلى E_1. ويمكن القيام بذلك بإغراقها في ضوء ليزر مكون من فوتونات كمومية طاقتها تساوي الفرق بين E_1 وE_0. إذا كانت شدة شعاع الليزر هي الشدة المناسبة وأثر هذا الشعاع للفترة الزمنية المطلوبة، فإن الذرة ستنتقل تدريجياً من الحالة الأساسية الساكنة إلى الحالة المثارة وذلك عندما يمتص إلكترونها فوتوناً أما إذا كانت الذرة في الحالة المثارة فعلاً فإن النبضة نفسها ستجعلها تبعث فوتوناً وبذلك تنتقل إلى الحالة الأساسية الساكنة. وبتعابير تخزين المعلومات، فإن النبضة توعز إلى الذرة لقلب «تغيير» Flip البتة الخاصة بها.

ماذا تعني كلمة «تدريجياً» هنا؟ ينقل مجال (حقل) كهربائي متذبذب، مثل ضوء الليزر، إلكتروناً في إحدى الذرات من حالة طاقة منخفضة إلى حالة أعلى بالطريقة نفسها التي يدفع بها شخص طفلاً على أرجوحة إلى أعلى. تعطي الموجة المتذبذبة دفعة صغيرة للإلكترون كلما مرت. وعندما تصبح طاقة الفوتونات في المجال مساوية للفرق بين E_1 وE_0 تتطابق هذه الدفعات مع الحركة «التأرجحية» للإلكترون وتحول الموجة المناظرة له إلى تراكب لموجات لها طاقات مختلفة. وستتناقص سعة الموجة المرتبطة بالحالة الأساسية الساكنة بصورة متواصلة، في حين تزداد سعة الموجة المرتبطة بالحالة المثارة. وخلال هذه العملية (تنقلب Flip البتة التي تسجلها الذرة من الحالة الأساسية الساكنة إلى الحالة المثارة. أما إذا اختلف تردد الفوتونات عن التردد الصحيح فإن دفعاتها لا تكون متوافقة مع الإلكترون، ولا يحدث شيء على الإطلاق.

إذا أثر الضوء المناسب لمدة تساوي نصف الزمن اللازم لتغيير حالة الذرة من 0 إلى 1، فإن الذرة ستكون في حالة تراكب بين الموجتين المناظرتين للحالتين 1 و0، ويكون لكل من هاتين الموجتين السعة نفسها. ومثل هذه البتة الكمومية، أو الـ (كوبتة) qubit كما تسمى، سوف تنقلب (تنتقل) إلى نصف المدى فقط. وخلافاً لذلك، فإن قراءة البتة الكلاسيكية تكون دائماً 0 أو 1. ويسبب المكثف الذي يحمل نصف شحنته العادية الأخطاء في الحاسوب التقليدي، أما الكوبتة نصف المنقلبة فستفتح الطريق لأنواع جديدة من الحواسيب.

إن قراءة البتات من نظام كمومي تشبه قلب (أو شقلبة) هذه البتات. نفترض أن الذرة دُفعت مجدداً إلى حالة طاقة أكثر علواً وأقل استقراراً، E_2 مثلاً. يتم ذلك بتعريضها لضوء طاقته تساوي الفرق بين E_1 وE_2. ستثار الذرة إلى الحالة E_2 ثم تتداعى بسرعة إلى الحالة E_1 وتبث خلال ذلك فوتوناً. إذا كانت الذرة في الحالة الأساسية الساكنة فعلاً فإنه لا يحدث شيء. أما إذا كانت في الحالة المنقلبة لنصف المدى فتوجد فرصتان متساويتا الاحتمال: إما أن تَبُث فوتوناً وتعلن أنها في الحالة 1 أو لا تبث فوتوناً معلنة أنها في الحالة 0. ولا تبعد عملية قراءة وكتابة المعلومات في نظام كمومي إلا خطوة قصيرة عن عملية إجراء الحسابات.

الحسابات الكمومية

تتكون الدارات الإلكترونية من عناصر خطية (مثل الأسلاك والمقاومات والمكثفات) وأخرى لا خطية (مثل الديودات «الصمامات الثنائية» والترانزستورات). تتعامل هذه العناصر مع البتات بأساليب مختلفة. تغير العناصر الخطية الإشارات الداخلة إليها كلاً على حدة. أما العناصر اللاخطية فإنها تجعل الإشارات الداخلة التي تمر خلالها تتفاعل. وعلى سبيل المثال، إذا وجد نظام صوتي مجسم (ستريو) لا يحتوي على ترانزستورات لا خطية، فإنك لا تستطيع تغيير (الصوت) (الخفيض) Bass في الموسيقى التي يعزفها. ويتطلب القيام بذلك بعض التنسيق بين المعلومات الصادرة عن القرص المدمج وتلك الآتية من زر الضبط الموجود في الجهاز.

تجري الدارات الإلكترونية الحسابات بتكرار عدد قليل من المهام البسيطة الخطية واللاخطية مرات عديدة وبسرعة فائقة. وإحدى هذه المهام هي قلب البتة، وهي تكافئ العملية المنطقية

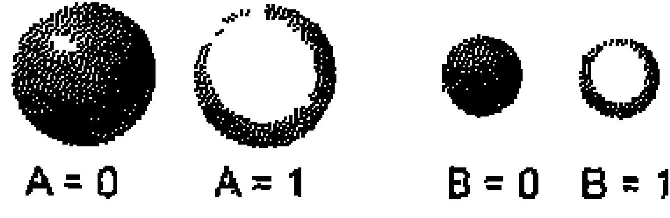
المسماة NOT: الـ«الصواب» يصبح «خطأ» والـ«خطأ» يصبح «صواباً». ثمة عملية منطقية أخرى، تسمى COPY، تجعل قيمة البتة التالية مساوية لسابقتها. وهاتان العمليتان خطيتان لأن الخرج في كليهما يعبّر عن قيمة دخل واحد. وتوجد عملية منطقية أخرى مفيدة تدعى AND وهي عملية لا خطية عند تطبيقها على اثنتين من البتات. إذا كانت قيمة كل اثنتين من بتات الدخل هي 1 فإن ذلك يجعل قيمة البتة الثالثة 1 أيضاً، وفيما عدا ذلك تكون قيمة البتة الثالثة 0. في هذه الحالة يتوقف الخرج على تفاعل معين بين الدخلين.

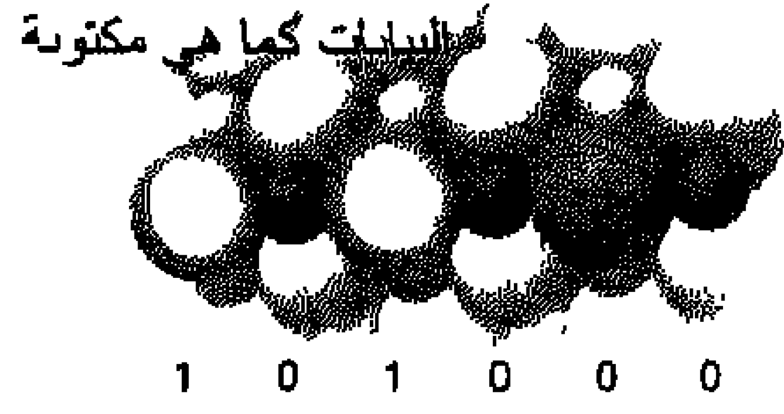
تسمى الوسائل التي تؤدي هذه العمليات بوابات منطقية. يمكن لحاسوب رقمي إذا احتوى على بوابات منطقية خطية مثل البوابتين NOT,COPY وعلى أخرى لا خطية مثل البوابة AND أن ينفذ أية مهمة منطقية أو حسابية. والمتطلبات هي نفسها للحواسيب الكمومية. لقد برهن (أ. إيكرت) (الذي كان يعمل مع دويتش ومع (أ. بارينكو) في أكسفورد) كما برهن كاتب المقال مستقلاً عنه، أن أي تفاعل لا خطي بين البتات الكمومية سيؤدي المهمة. وبالفعل، إذا تيسر لحاسوب كمومي أن يقلب البتات، فإن أي تفاعل لا خطي سيمكّنه من إجراء أية عملية حسابية. وبالتالي يمكن استثمار العديد من الظواهر الفيزيائية المتنوعة لبناء حاسوب كمومي.

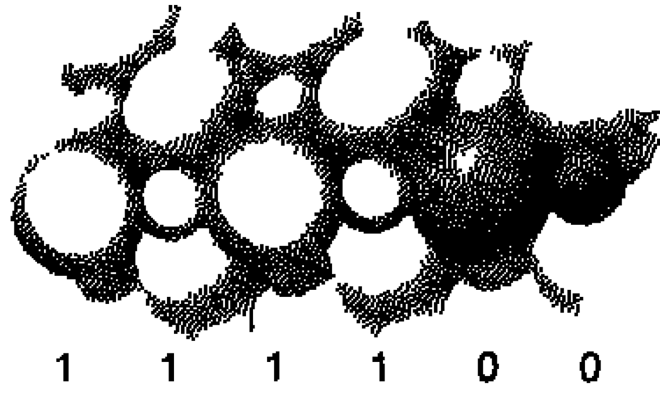
وفي الواقع، إن البوابات المنطقية الكمومية المتعددة الأغراض كانت متاحة منذ اكتشافها الترانزستور. تمكّن الباحثون في أواخر العقد الخامس من هذا القرن من إجراء عمليات منطقية كمومية بسيطة تتضمن بتتين فقط، وذلك باستخدام (سبينات) Spins الجسيم. وهذه السبينات، التي هي ببساطة اتجاهات دوران الجسيم بالنسبة لمجال مغنطيسي معين، هي كمومية مثلها في ذلك مثل مستويات الطاقة. وبالتالي يمكن أن يمثل السبين 1 في اتجاه ما و0 في اتجاه آخر. استفاد الباحثون من التفاعل بين سبين الإلكترون وسبين البروتون في ذرة الهيدروجين، ووضعوا نظاماً لا يسمح بقلب سبين البروتون إلا إذا مثل سبين الإلكترون 1. ولأن هؤلاء الباحثين لم يفكروا في المنطق الكمومي فقد أطلقوا على هذا التأثير اسم (الرنين المزدوج) Double Resonance. وبالرغم من ذلك، فقد استخدموا الرنين المزدوج لإجراء العمليتين NOT وCOPY الخطيتين.

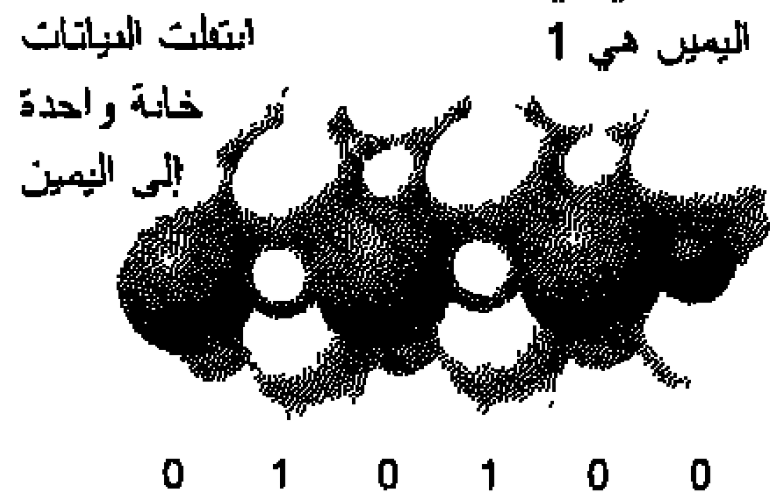
بعد ذلك برهن بارينكو و(د. دي فنسنزو) (من شركة IBM) و(ت. سليتور) (من جامعة نيويورك) و(هـ. واينفورتر) (من جامعة إنسبروك) كيف يمكن، عن طريق القلب الجزئي لسبين بروتون وسبين إلكترون، استخدام الرنين المزدوج للحصول أيضاً على البوابة AND. ويمكن لمثل هذه البوابات المنطقية الكمومية عند وصلها معاً بأسلاك، أن تكوّن حاسوباً كمومياً. ولا توجد حاجة إلى تأكيد أن بناء «الأسلاك» الكمومية هو أمر بالغ الصعوبة. إن الأسلاك في الحواسيب التقليدية هي مجرد شرائط معدنية رفيعة تقوم بتوصيل إشارات الفلط من بوابة منطقية إلى أخرى.

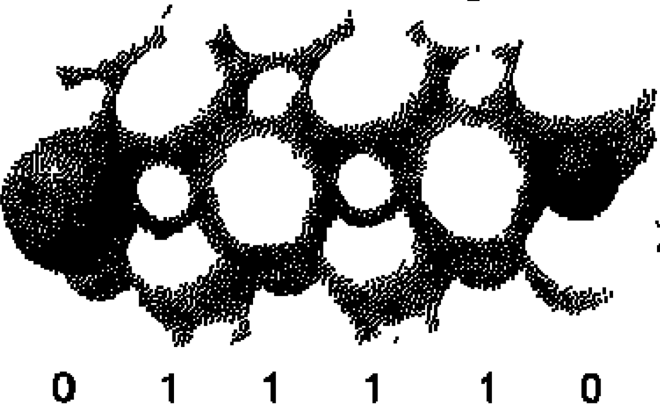
يمكن لبلورة الملح إجراء الحسابات، وذلك بالتأثير في أزواج من الأيونات المتجاورة. لنقلب البتة المحتواة في أي ذرة B إذا كانت الذرة A التي في يسارها تخزن 1، وبعد ذلك لنقلب كل A إذا كانت الـB التي في يمينها هي 1، إن ذلك ينقل المعلومات من كل A إلى الـB التي في يمينها. والآن، باستخدام الخطوات نفسها تُنقل المعلومات من كل B إلى الـ A التي في يمينها. إن هذه العملية تمكن خطاً من الذرات من أن يعمل مثل «سلك» كمومي. وبما أن البلورة يمكنها إجراء عمليات «الرنين المزدوج» هذه آنياً بالوقت نفسه في جميع الاتجاهات ومع كل أيون مجاور (الشكل السفلي في اليمين)، فبإمكانها أن تحاكي ديناميكياً أي نظام وبالتالي أن تؤدي عمل حاسوب تناظري كمومي متعدد الأغراض.

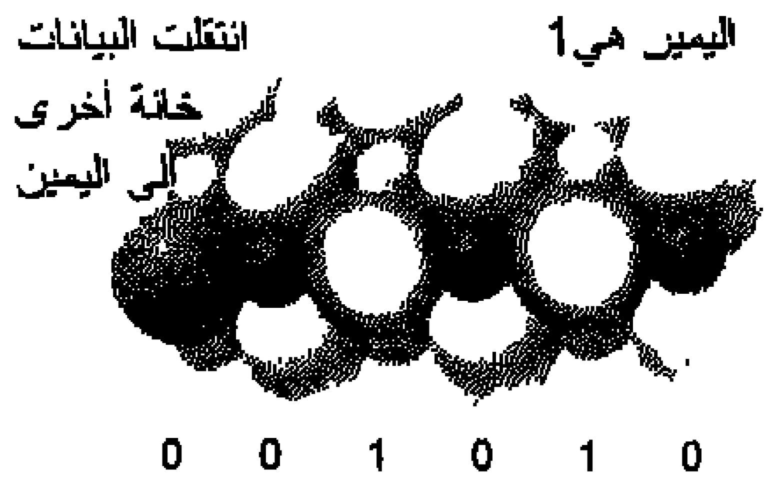


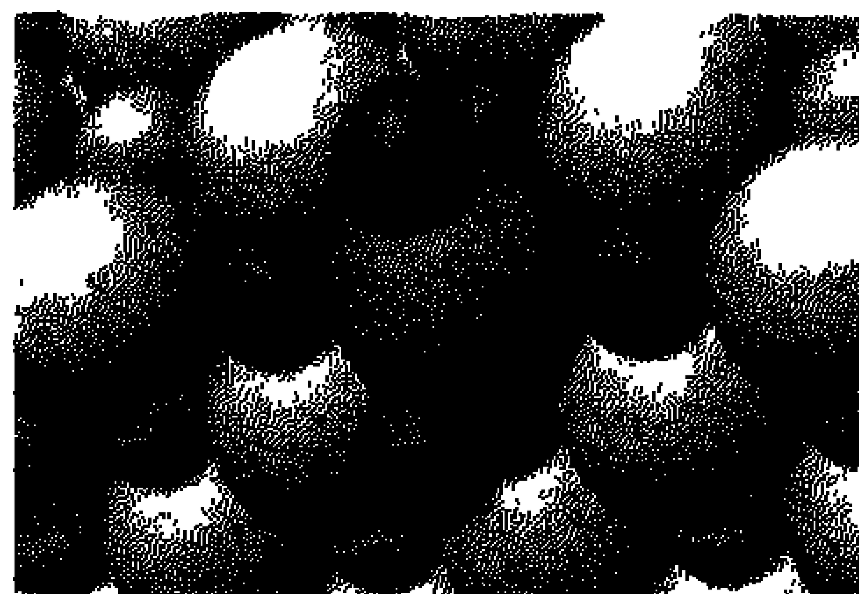


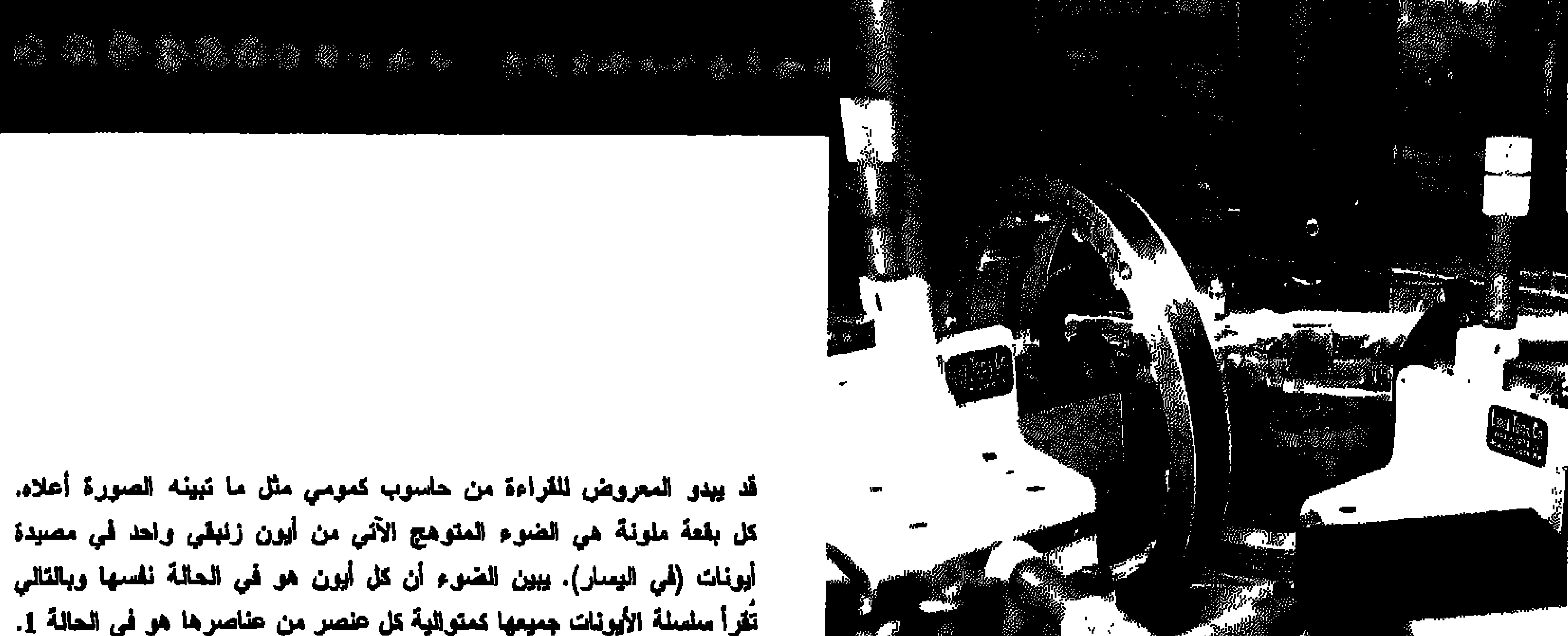












قد يبدو المعروض للقراءة من حاسوب كمومي مثل ما تبينه الصورة أعلاه. كل بقعة ملونة هي الضوء المتوهج الآتي من أيون زئبقي واحد في مصيدة أيونات (في اليسار). يبين الضوء أن كل أيون هو في الحالة نفسها وبالتالي تُقرأ سلسلة الأيونات جميعها كمتوالية كل عنصر من عناصرها هو في الحالة 1.

وعلى خلاف ذلك، فإن وصل بوابات الرنين المزدوج بأسلاك هو عمل صعب بدرجة مخيفة. يجب أن يتمكن السلك من تفكيك الذرات لكي يتسنى للإلكترونات والبروتونات أن تتحرك بحرية، وأن يعيد تجميع الذرات، وكل ذلك من دون إقلاق سبينات الجسيمات.

ومنذ وقت قريب، صمم الباحثون وسائل أقل صعوبة للربط بين بوابات المنطق الكمومية. فمثلاً، يمكن للفوتونات المنفردة عند مرورها خلال الألياف الضوئية، أو خلال الهواء، أن تنقل بتات معلومات من بوابة إلى أخرى. وقد أتى أحد التطورات المبشرة بالأمل من معهد كاليفورنيا للتقانة. فقد نجحت مجموعة كيمبل في تعزيز التفاعل اللاخطي (الضئيل عادة) بين الفوتونات وذلك عن طريق تركيز الفوتونات مع ذرة واحدة في حجم ضئيل للغاية، ونتج من هذا بوابة منطقية كمومية. يمكن أن تنقلب بتة فوتون جزئياً عندما تكون قراءة فوتون آخر هي 1. وسيكون الحاسوب المبني بناء كاملاً من مثل هذه البوابات البصرية الكمومية سريعاً ومحصّناً نسبياً ضد التشويش الذي ينشأ في جواره والذي قد يقضي على الترابط. ولكن مثل هذا الحاسوب سيظل يواجه عدداً من العقبات التي تنبأ بها لانداور، وعلى الخصوص يجب أن تكون أطوال جميع المسارات الضوئية في النظام دقيقة إلى حد كسرٍ ضئيل من طول موجة الضوء المستخدم.

توجد حلول أخرى لمشكلة الأسلاك. لقد اقترح (ج. إيكناسيو سيراك) (من جامعة كاستيلا لامانشا بإسبانيا) و(ب. زولر) (من جامعة إنسبروك) تصميماً يمكن فيه حصر الكوبتات في مصيدة أيونات، وبالتالي عزلها فعلياً عن أية تأثيرات خارجية غير مطلوبة. تحول البتة قبل معالجتها إلى مسجل مشترك أو (حافلة) Bus. وبالتحديد، تمثل المعلومات التي تحملها البتة بحركة اهتزازية لكل الأيونات الموجودة في المصيدة. كانت مجموعة واينلاند في المعهد القومي للمعايير والتقانة هي التي بدأت تحقيق مثل هذا الحاسوب الكمومي الذي يؤدي العمليات الخطية واللاخطية على البتات التي تحررها الأيونات والحركة الاهتزازية. والتوقعات جيدة بالنسبة لبناء حواسيب مصيدة أيونات لها عدة عشرات أو مئات من البتات: لقد تم بالفعل إجراء العمليات التي تتضمن اثنتين من البتات، ويمكن ببساطة زيادة عدد البتات في الحاسوب بإضافة أيونات أخرى في المصيدة.

وواقع الحال الآن هو أن العلماء يستطيعون التحكم في عمليات المنطق الكمومية على عدد قليل من البتات، وربما يتمكنون في المستقبل القريب من إجراء الحسابات الكمومية باستخدام عدة عشرات أو عدة مئات من البتات. كيف يمكن اعتبار ذلك تقدماً على الحواسيب التقليدية التي تتعامل روتينياً مع البلايين من البتات؟ في الواقع، إن الحاسوب الكمومي يمكنه حتى ببتّة واحدة أن ينفذ أموراً يعجز عنها الحاسوب التقليدي. لتوضيح ذلك ننظر في المثال التالي: نأخذ ذرة في حالة تراكب بين 1 و0 ونحاول معرفة ما إذا كانت قيمة البتة 1 أو0 عن طريق جعلها تتوهج. تبث الذرة فوتوناً خلال نصف الوقت وتكون قيمة البتة 1. وخلال النصف الثاني من الوقت لا تبث الذرة فوتوناً وتكون قيمة البتة 0. وبعبارة أخرى نقول إن البتّة عشوائية ــ وهذا أمر لا يتمكن الحاسوب التقليدي من إحداثه. وفي الواقع، إن برامج الأعداد العشوائية في الحواسيب الرقمية تولد أعداداً (شبه عشوائية) Pseudorandom، وذلك باستخدام دالةٍ خرجُها غير منتظم إلى درجة تبدو معها أنها تنتج البتات مصادفة.

الحالات الكمومية لجسيمات متعددة

لنتخيل ما يمكن لحاسوب كمومي أن يؤديه باثنتين من البتات: نسخ الأعمال بوضع اثنتين من البتات معاً، إحداهما لها قيمة يتم نسخها والأخرى بقيمة أصلية 0، ولا تقلبُ نبضة مؤثرة البتة الثانية إلى القيمة 1 إلا إذا كانت قيمة الأولى هي 1 أيضاً. أما إذا كانت قيمة البتة الأولى هي نتيجة تراكب بين 0 و1، فإن النبضة المؤثرة تُوجِدُ

تراكباً يتضمن البتتين معاً، بحيث تكون كل منهما إما 1 وإما 0. يُلاحظ أن القيمة النهائية للبتة الأولى لم تعد كما كانت في الأصل ــ لقد تغير التراكب.

في كل من مكونات هذا التراكب، تماثل البتة الثانية البتة الأولى، ولكن كل واحدة منهما تختلف عن البتة الأصلية. لقد ذكر ألبرت آينشتاين أن مثل هذه الحالات تخالف كل الحدسيات التقليدية عن السببية. في مثل هذا التراكب لا تكون أية واحدة من البتتين في حالة محددة. ومع ذلك إذا قيست إحدى البتتين ــ وبالتالي تم وضعها في حالة محددة، فإن البتة الأخرى تدخل أيضاً في حالة محددة ــ إن التغير في البتة الأولى لا يسبب التغير في الأخرى. ولكن نتيجة لهدم الارتباط بين البتتين، فإن قياس الأولى يميط الغموض عن الأخرى. وتنشأ حالات متشابكة أكثر غرابة بين ثلاث كوبتّات.

وبالفعل، إذا كان لدينا اثنتان أو ثلاث من الكوبتّات وواحدة أو اثنتان من بوابات المنطق الكمومية، فإنه يمكن إيجاد حالات كمومية تثير الإعجاب. لقد أوضحت أنه بعدد أكبر من البتات يمكن للحاسوب الكمومي أن يحاكي أي نظام كمومي. وإذا تمت برمجة الحاسوب الكمومي برمجة مناسبة، تصبح ديناميكيته الديناميكية نفسها لنظام ما مفترض، بما في ذلك تفاعل هذا النظام مع البيئة المحيطة به. وسيتناسب عدد الخطوات اللازمة للحاسوب لكي يتابع تطور هذا النظام مع الوقت تناسباً طردياً مع حجم هذا النظام.

والأمر الذي يبعث على الدهشة أكثر، هو أنه إذا وجد هيكل مواز لحاسوب كمومي، ويمكن التوصل إلى ذلك عن طريق الرنين المزدوج بين أزواج السبينات المتجاورة في ذرات بلورة، فإن هذا الحاسوب سيتمكن من محاكاة أي نظام كمومي في زمن حقيقي محسوس مهما كان حجم هذا النظام. وهذا النوع من إجراء الحسابات الكمومية بالتوازي، إذا أمكن التوصل إليه، سيوفر سرعة أعلى بكثير من السرعات المتاحة بالطرق التقليدية. وكما لاحظ فينمان، فإن محاكاة نظام كمومي باستخدام حاسوب تقليدي تستلزم عادة خطوات يزداد عددها أسيّاً كلما زاد حجم النظام، وأيضاً كلما زادت الفترة الزمنية المطلوب دراسة سلوك النظام خلالها. وفي الواقع، يمكن لحاسوب كمومي له أربعون بتّة أن يعيد بناء نظام كمومي في نحو مئة خطوة في حين يستغرق حاسوب تقليدي، به تريليون بتّة، سنوات لمحاكاة النظام نفسه.

ماذا يمكن لحاسوب كمومي أن يفعل باستخدام العديد من العمليات المنطقية على العديد من الكوبتّات. نبدأ بوضع جميع البتات الداخلة في حالة تراكب متساو لــ0 و1 ، على أن يكون لكل منها القيمة نفسها. وعلى ذلك يكون الحاسوب في حالة تراكب متساوٍ لجميع الدخول الممكنة. نمرر الآن هذا الدخل خلال دارة منطقية تؤدي عملية حسابية معينة. ستكون النتيجة تراكباً لجميع الخروج الممكنة لهذه العملية. والمعنى الكمومي الغريب لذلك هو أن الحاسوب يؤدي جميع الحسابات الممكنة في الوقت نفسه. وقد أطلق دويتش على هذه النتيجة اسم (التوازي الكمومي) Quantum Parallelism.

إن التوازي الكمومي قد يبدو غريباً، ولكن لنر كيف تعمل الموجات بصورة عامة. إذا كانت الموجات الميكانيكية الكمومية موجات صوتية فإن الموجات التي تناظر 0 و1 ــ وكل منها يتذبذب بتردد واحد فقط ــ تكوِّن نغمات صافية. وبالتالي فالموجة التي تناظر تراكباً بين 0 و1 تكوِّن وتراً. وكما أن الوتر الموسيقي يعطي صوتاً يختلف نوعياً عن النغمات المنفردة التي يتضمنها، فإن التراكب بين 0 و1 يختلف عن 0 وعن 1 مأخوذين كل على حدة. وفي كلتا الحالتين تتداخل الموجات المركبة بعضها مع بعض.

إن الحاسوب الكمومي الذي يجري عملية حسابية عادية لا يدخل فيها تراكب للبتّات يولّد متتابعة من الموجات تماثل صوت القَرْع المتغير الصادر عن كنيسة إنكليزية عندما لا يتم قرع الأجراس في الوقت نفسه. وتتابُعُ الأصوات يخضع لقواعد رياضياتية معينة. أما العملية الحسابية التي تتم في نظام التوازي الكمومي، فتشبه سيمفونية: و«الصوت» الذي ينشأ عنها هو صوت موجات كثيرة متداخلة بعضها مع بعض.

لقد بين شور وهو يعمل في مختبرات بل، منذ فترة قصيرة، أن التأثير السيمفوني للتوازي الكمومي يمكن استخدامه لتحليل الأعداد الكبيرة إلى عواملها الأولية بسرعة فائقة ــ وهو أمر تعجز عن أدائه الحواسيب التقليدية وحتى العملاقة منها. وأوضح شور أن عملية حسابية تتم بالتوازي الكمومي يمكن أن يُرتَّب أداؤها بحيث تبرز العوامل المهمة في التراكب بالأسلوب نفسه الذي تبرز به نغمة تُعزف بآلات الكمان والكمان الأوسط والكمان الكبير وبتردد يساوي ضعف تردد النغمات التي تؤدي بالآلات الأخرى المجاورة عند عزف سيمفونية. وفعلاً، فإن نظام حسابات شور يجعل التحليل إلى العوامل الأولية مهمة سهلة بالنسبة للحاسوب الكمومي، هذا إذا أمكن بناء مثل هذا الحاسوب. ولأن أغلب الأنظمة العامة التي تحافظ على السرية، مثل التي تحمي الحسابات المصرفية الإلكترونية، تعتمد على حقيقة أن الحواسيب الكلاسيكية تعجز عن الكشف عن عوامل الأعداد التي يزيد عدد أرقامها على المئة (تقريباً)، فإن المحتالين من مستخدمي الحواسيب الكمومية سيسببون القلق للعديد من الناس.

يحظى التساؤل: هل سنتوصل إلى الحواسيب الكمومية (وبالتالي سيوجد المحتالون الكموميون) أم لا بمجادلات حادة. نتذكر هنا أن الطبيعة الكمومية للتراكب لا تسود إلا إذا امتنعت البيئة المحيطة، بطريقة ما، عن الكشف عن حالة النظام. ربما تتكون الحواسيب الكمومية هي الأخرى من آلاف أو ملايين الذرات. ويكفي اضطراب واحدة فقط من هذه الذرات لإفساد التوافق الكمومي. وليس واضحاً إلى أي حد يمكن أن تستمر النظم

الكمومية المتفاعلة في حالة تراكب كمومي حقيقي. تبين التجربة أن بعض النظم يمكن أن يحتفظ بحالات تراكبات كمومية لبضع ساعات. وقد برهن شور ومعاونوه أن نظام الحسابات الذي وضعه يستطيع الاستمرار بالعمل مع وجود مستويات منخفضة من التوافق.

ثمة مشكلة أخرى تقابل الحواسيب الكمومية، هي تصحيح الأخطاء. تتعرض مختلف الأنظمة التي تُستخدم لتسجيل ومعالجة المعلومات للتشويش الذي يستطيع أن يقلب البتات بطريقة عشوائية. وتتضمن الطرق التقليدية لتصحيح الخطأ قياس بتّات للكشف عما إذا كانت خاطئة. وهذا الأسلوب يؤدي، في حالة الحواسيب الكمومية، إلى عدم الترابط وقد برهنت مجموعتا إيكرت ودويتش أن تصحيح الخطأ الكمومي ممكن من ناحية المبدأ ولكنه صعب المنال عند التطبيق. وعلى ذلك فحتى لو أمكن بناء الحواسيب الكمومية فإنها لن تتمكن من الاستمرار في إجراء الحسابات التي تتضمن العديد من البتّات لفترات زمنية طويلة.

ولكي تستطيع الحواسيب الكمومية التفوق على الحواسيب العملاقة الحالية في قدرتها على التحليل إلى العوامل يلزمها في الأغلب، عند استخدام نظام حسابات شور، أن تتابع مئات البتات لآلاف الخطوات مع المحافظة على الترابط الكمومي طوال الوقت. وبسبب المشكلات التقنية التي ذكرها لانداور، بما في ذلك فقد الترابط والتغيرات في نبضات الليزر التي يتعذر التحكم فيها وعدم وجود وسيلة فعالة لتصحيح الأخطاء، فإن بناء حاسوب لإجراء مثل هذه الحسابات سيكون من الصعوبة بمكان على الأغلب. ومع ذلك فإن كل ما يلزم لتجاوز المحاكاة التقليدية للأنظمة الكمومية هو مجرد تتبع عشرات من البتات فقط على مدى عشرات من الخطوات، وهو هدف احتمال التوصل إليه أكبر. كذلك فإن استخدام المنطق الكمومي لإنشاء حالات كمومية غريبة تتضمن جسيمات متعددة والكشف عن خواصها هو هدف في متناولنا حالياً.

المؤلف

Seth Lloyd

عضو هيئة التدريس في قسم الهندسة الميكانيكية بمعهد ماساتشوستس للتقانة. حصل لويد على أولى درجاته العليا في الفلسفة من جامعة كامبردج عام 1984، وعلى الدكتوراه في الفيزياء من جامعة روكفلر عام 1988. وقد عمل بعد حصوله على الدكتوراه في معهد كاليفورنيا للتقانة وفي مختبر لوس ألاموس القومي. ويعمل منذ 1989 مدرساً منتدباً في معهد «سانتافي» بولاية نيومكسيكو.

مراجع للاستزادة

QUANTUM-MECHANICAL MODELS OF TURING MACHINES THAt DISSIPATE NO ENERCY. Paul Benioff in *Physical Review Letters*, Vol. 48, No. 23, Pages 1581-1585; June 7, 1982.

QUANTUM THEORY: THE CHURCH-TURING PRINCIPLE AND THE UNIVERSAL QUANTUM COMPUTER. David Deutsch in *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 400, No. 1818, Pages 97-117; 1985.

A POTENTIALLY REALIZABLE QUANTUM COMPUTER. Seth Lloyd in *Science*, Vol. 261, Pages 1569-1571; September 17, 1993.

ALGORITHMS FOR QUANTUM COMPUTATION: DISCRETE LOGARITHMS AND FACTORING. Peter W. Shor in 35th *Annual Symposium on Foundations of Computer Science: Proceedings*. Edited by Shafi Goldwasser. IEEE Computer Society Press, 1994.

QUANTUM COMPUTATIONS WITH COLD TRAPPED IONS. J. I. Cirac and P. Zoller in *Physical Review Letters*, Vol. 74, No. 20, Pages 4091-4094; May 15, 1995.



التفاعلات الكيميائية الكمومية
في درجات الحرارة شديدة الانخفاض

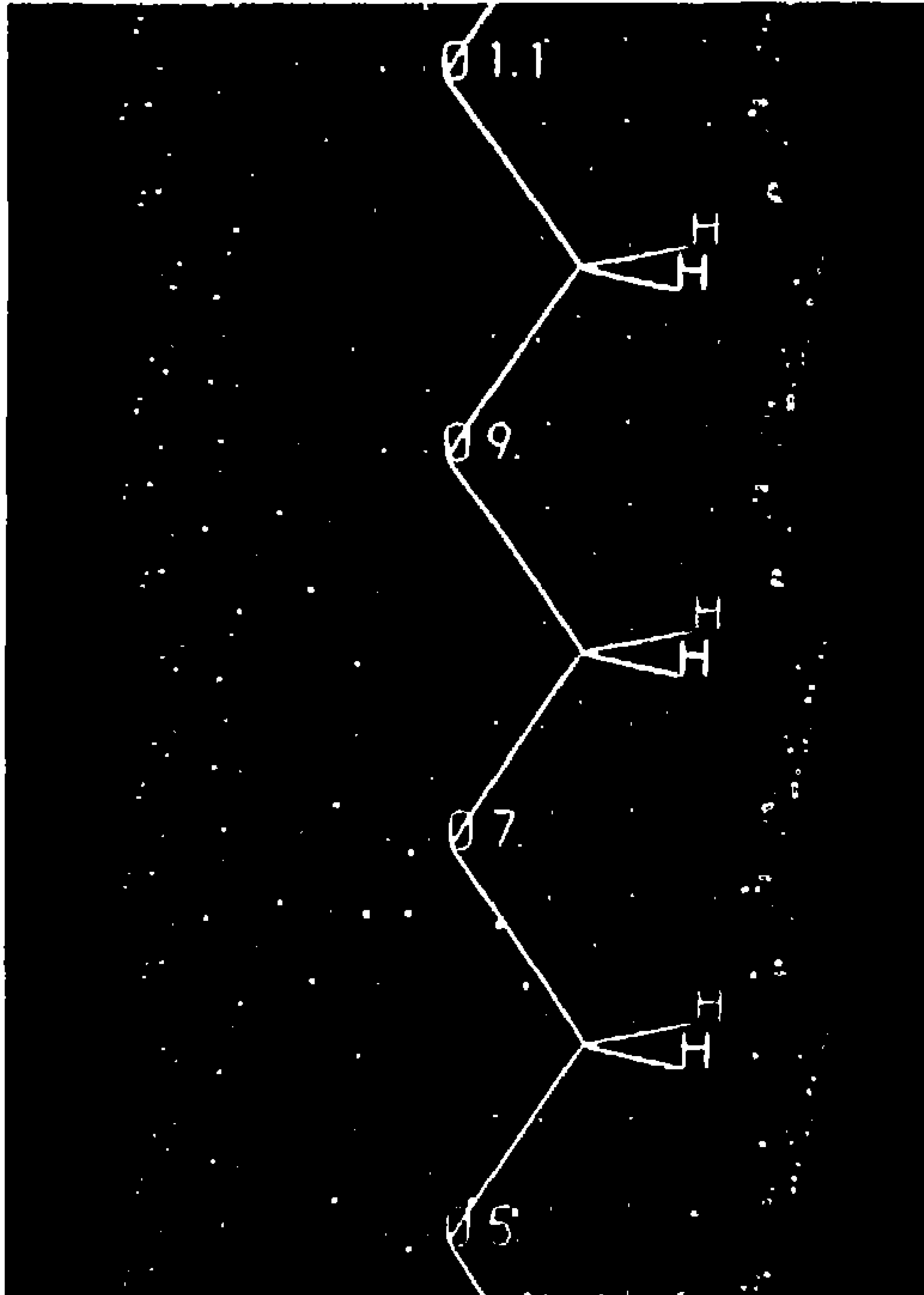
تسمح بعض تأثيرات ميكانيك الكم، لبعض التفاعلات المتعذر حدوثها تقليدياً، بأن تحدث عند درجات الحرارة القريبة من درجة الصفر المطلق. ويعني ذلك أن سحب غبار المجرة الداكنة الباردة يمكن أن تحتوي على أصل الحياة.

(ف. أ. كولدنسكي)

نعلم من خلال تجربتنا اليومية، أن التفاعلات الكيميائية تتباطأ عند درجات الحرارة المنخفضة، لذلك مثلاً، تحفظ اللحوم بتجميدها وقد أدرك الناس منذ القدم هذه الحقيقة واستفادوا منها. كما أن الكيميائي الفيزيائي «س. أرهينيوس» Svante Arrhenius اقترح، منذ حوالي القرن، قانوناً في الكيمياء التقليدية يربط سرعة التفاعل الكيميائي بدرجة الحرارة.

ووفقاً لهذا القانون، فإن سرعات سائر التفاعلات الكيميائية تبلغ الصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق [وهي درجة الصفر في سلم كلفن، أو الدرجة (-273) في سلم سلزي (السلم المئوي)]، وليست هذه النتيجة سوى تعبير آخر لقولنا إن سائر التفاعلات الكيميائية لابد وأن تتوقف.

وتشير الدلالات التجريبية إلى أن معادلة أرهينيوس، التي تعبر بدقة بصورة عامة، عن سرعات التفاعلات الكيميائية في مجال درجات الحرارة المرتفعة نسبياً، قد فشلت في تحقيق ذلك في مجال درجات الحرارة المنخفضة. إذ يبدأ في هذا المجال أحد تأثيرات ميكانيك الكم، المعروف بعبور النفق، بالقيام بدور أساسي يتيح المجال أمام قيام تفاعلات يتعذر حدوثها عادة. وهكذا مثلاً، تستطيع ذرات بكاملها أن تشق نفقاً عبر الحواجز الممثلة بقوى التنافر، التي تؤثر بها الذرات الأخرى، مشكلة جزيئات معقدة، حتى ولو لم يكن لتلك الذرات الطاقة، التي تتطلبها الكيمياء التقليدية للتغلب على هذا التنافر. ومن الطبيعي أن تكون سرعة تشكل هذه الجزيئات المعقدة ضئيلة جداً، إلاّ أن عبور النفق يقوم فيها بدور واضح. وقد طرحت، في هذا الصدد، فكرة نشوء الحياة في الماضي السحيق في وسط بارد: أي تشكل جزيئات عضوية معقدة غالباً في الفضاء الخارجي شديد البرودة حيث تصل درجة الحرارة عادة إلى بضع درجات كلفن فقط. وقد تكون الأشعة الكونية (المكونة من بروتونات ومن دقائق أخرى ذات طاقة عالية)، هي المسؤول عن إثارة اصطناع مثل هذه الجزيئات في السحب الداكنة المشكلة للغبار المنتشر بين النجوم، إلاّ أن هذه التفاعلات تتابعت بعد ذلك، بصورة بطيئة ولكنها أكيدة، بسبب عبور النفق.



متماثر (بلمر polymer ويقال أيضاً بوليمر) الألدهيد النملي يمكن اصطناع سلسلة طويلة من جزيئات الألدهيد النملي المنفردة، في درجة حرارة الهيليوم السائل [الدرجة 4.2 كلفن أو (-269) سلزية] علماً بأن القوانين التقليدية تشير إلى توقف معظم التفاعلات الكيميائية في مثل درجة الحرارة المنخفضة هذه، لذلك يُعدّ اصطناع متماثر (بلمر) الألدهيد النملي نتيجة لواحد من تأثيرات ميكانيك الكم يعرف بعبور النفق. ويمكن لجزيئات الألدهيد النملي أن تتطور في الفضاء الخارجي شديد البرودة لتشكل مركبات عضوية معقدة مثل النشا والسليلوز وعلى هذه الصورة المعدة بالحاسوب (الكمبيوتر)، والتي حضرها «ب. وينر» Paul Weiner وزملاؤه من جامعة رتجرز، تشير النقاط الحمراء حول ذرات الأكسجين (O) إلى نقاط الجهد (الكمون) السالب، بينما تشير النقاط الزرقاء حول ذرات الهيدروجين (H) وحول ذرات الكربون (الرؤوس غير المعلمة) إلى نقاط الجهد الموجب.

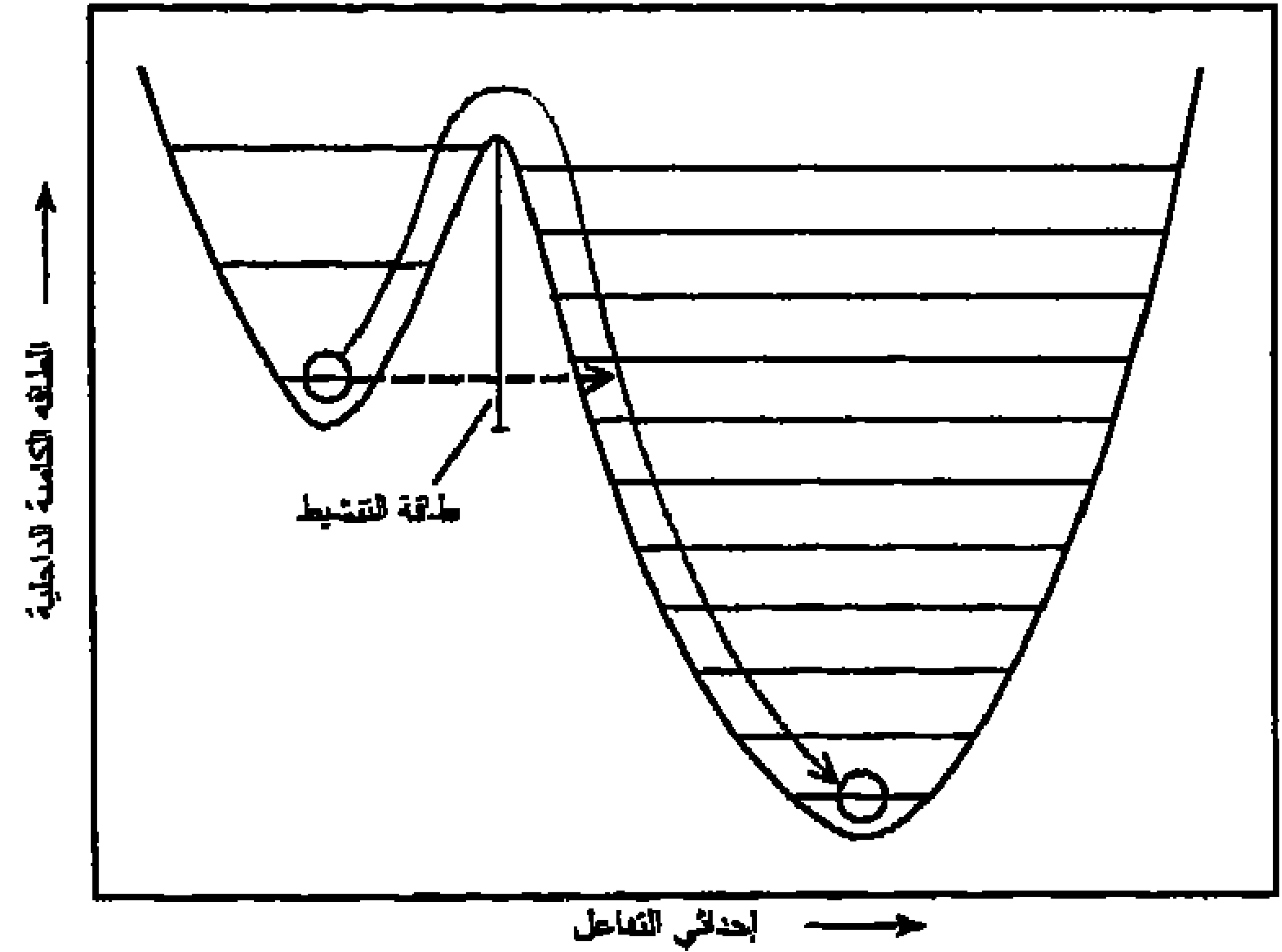
ولم يمض عام على اقتراحي هذا، حتى بيَّن عالما الفيزياء الفلكية البريطانيان «ف. هويل» Fred Hoyle و «ن.س. ويكر اماسنك» N.C. Wickramasinghe (1973) أن جزيئات الألدهيد النملي (الفورمالدهيد) الموجودة في السحب الداكنة ما بين النجوم قد تحولت فعلاً إلى مركبات السكريات المتعددة الثابتة مثل النشا والسليلوز.

وقد أثارت استنتاجاتها هذه عاصفةً كبرى من النقد والجدل الحاد، إلاّ أنها أحدثت اهتماماً وإثارةً بالغين لدى باحثين يميلون لأن يعتبروا سحب المجرة، الأمكنة التي حدث فيها التطور ما قبل البيولوجي للمركبات الضرورية للحياة.

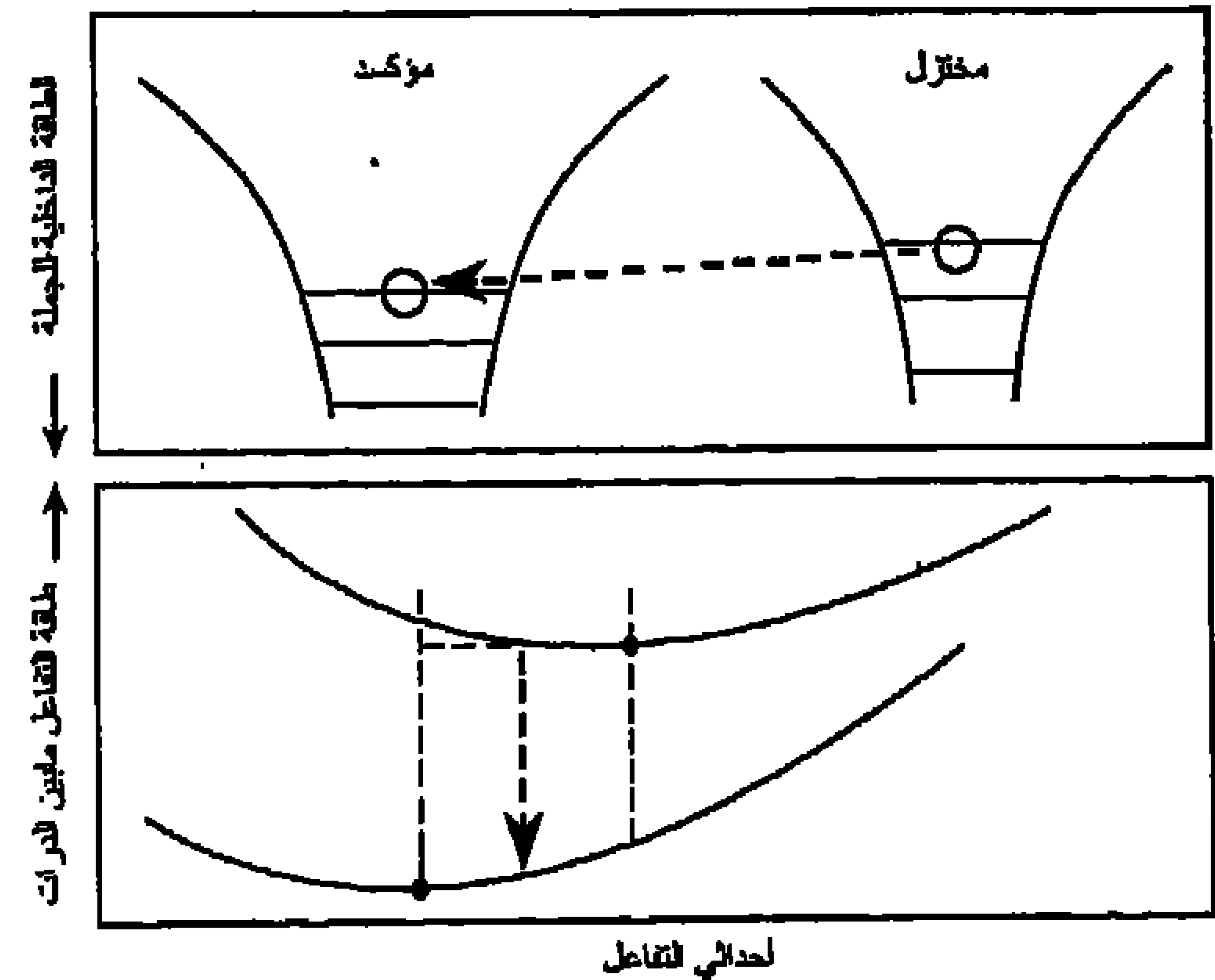
ولست أهدف هنا أن أؤيد أو أن أدحض دعوى هذين العالمين، إلاّ أنني أود مع ذلك أن أشير إلى أنه إذا كانت جزيئات الألدهيد النملي الموجودة في السحب بين النجوم قد تطورت إلى جزيئات معقدة، فإن ذلك لا يمكن أن يكون قد حدث إلاّ من خلال عبور النفق. وقد يكون من المناسب في كلامنا عن الدور الذي يمكن أن تلعبه التفاعلات الكيميائية الباردة في التطور ما قبل البيولوجي للمركبات، أن نتذكر الكلمات التي خاطب بها الشاعر الروسي «ف. ماياكوفسكي» Vladimir Mayakovski الشاعر والروائي «أ. بوشكين» Aleksander- Pushkin حيث قال: «إن الأبدية لنا، فلماذا لا نصرف منها بضع ساعات».

تعتمد سرعة أي تفاعل كيميائي وأيّاً كانت درجة الحرارة التي يجري فيها، على خاصية مميزة وهامة جداً تعرف بطاقة تنشيط التفاعل، ويمكن إيضاحها على النحو التالي:

يمكننا أن نتخيل أيّ جزيء ما، وكأنه قابع في قاع ما يعرف ببئر جهد (أو كمون) الطاقة. ويتوقف عمق هذا البئر وعرضه على وضع الترتيب الفراغي للذرات المكونة للجزيء، والذي يتبدل أثناء سير التفاعل الكيميائي؛ ويتوافق هذا التفاعل وانتقال جزيء من قاع بئر جهد إلى قاع بئر جهد آخر، علماً بأن هذا الانتقال لا يتحقق، من وجهة النظر التقليدية، إلاّ بالمرور فوق حاجز التنشيط أو حاجز الجهد الكائن ما بين البئرين، والذي يعرف ارتفاعه باسم طاقة تنشيط التفاعل، وكلما كانت هذه الطاقة أكبر كانت سرعة التفاعل أبطأ. هذا وتكون قيم طاقات التنشيط عادة أكبر بحوالي عشر مرات أو أكثر من قيم الطاقات الحرارية المألوفة التي للجزيئات في مجالات درجات الحرارة القريبة من درجة 300 كلفن. أما عند درجة حرارة الهيليوم السائل البالغة 4.2 كلفن، فإن قيم طاقات التنشيط تكون أكبر بحوالي ألف مرة من قيم الطاقات الحرارية للجزيئات. لذلك لا يمكن، وفقاً لمفاهيم الكيمياء التقليدية، للعديد من التفاعلات أن تجري سواء في درجة الحرارة الاعتيادية (أي في درجة حرارة الغرفة) أو في درجة حرارة الهيليوم السائل، إلا بعد تزويد الجزيئات المتفاعلة بطاقة إضافية. والأمر هنا أشبه ما يكون بعملية سحب اليانصيب، إذ قبل أن يكون بوسعك أن تربح أي



عبور النفق: إن عبور النفق بين آبار الجهد يسمح بقيام تفاعلات كيميائية يتعذر حدوثها بطرق أخرى. تتوافق آبار الجهد (الكمون) هذه والترتيبات الفراغية المختلفة للذرات في الجزيء، وتتغير الطاقة الداخلية لكل ترتيب (والممثلة على محور التراتيب أي المحور الرأسي)، بتغير إحداثي التفاعل أو المسافة الكائنة بين الذرات في الجزيء (الممثلة على محور الفواصل أو المحور الأفقي). يمكن أن نتخيل الجزيء ذاته وقد ألم في قاع بئر جهد ولما كانت الطاقة الداخلية للجزيء تتغير أثناء سير التفاعل الكيميائي، فإنه يمكن تمثيل هذا التفاعل وكأنه انتقال جزيء ما من قاع بئر جهد إلى قاع بئر آخر. يعوق هذا الانتقال حاجز طاقة يعرف بطاقة التنشيط. هذا ويستطيع الجزيء من وجهة نظر الكيمياء التقليدية، أن ينتقل من بئر جهد إلى بئر أخرى وذلك، فقط، باجتيازه حاجز طاقة التنشيط هذا (الممثل بالخط المتصل الملون)، إلاّ أن بوسعه، من وجهة نظر ميكانيك الكم، أن يعبر نفقاً عبر الحاجز (وهو الممثل بالخط المتقطع الملون) وذلك حتى في درجات الحرارة شديدة الانخفاض. تمثل الخطوط الرمادية مستويات طاقة الجزيء التي يسمح بها ميكانيك الكم.



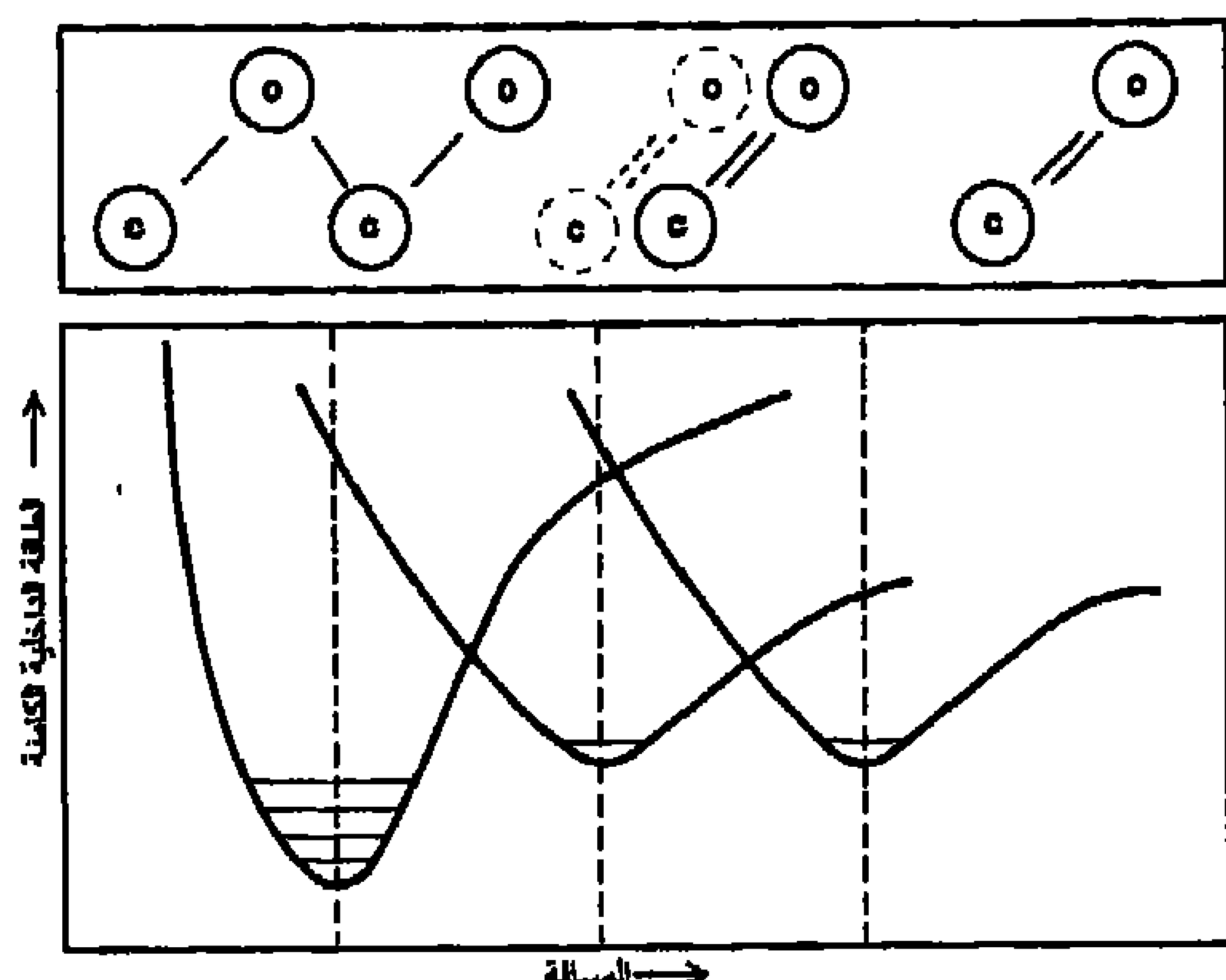
تفاعل الأكسدة والاختزال يتضمن هذا التفاعل انتقال إلكترون من الجسم المختزل (وهو الذرة أو الجزيء التي تقدم الإلكترونات)، إلى الجسم المؤكسد (وهو الذرة أو الجزيء التي تتقبل الإلكترونات). يبين الجزء العلوي من هذا الشكل النفق الذي يخترقه إلكترون تكافؤ، أو إلكترون خارجي، من المختزل إلى المؤكسد. وتنشأ آبار الجهد عن التجاذب الكهربائي القائم بين الإلكترون ذي الشحنة السالبة ونوى النوعين الكيميائيين المعتبرين ذوي الشحنة الموجبة. أما الجزء السفلي من الشكل فيمثل التأثير الذري المتبادل الذي تعانيه ذرات الجسم المختزل قبل أن تفقد إلكترونها (المنحنى العلوي) وبعد أن تفقده (المنحنى السفلي). أما انتقال الإلكترون فيمثل بالخط المتقطع الملون. هذا وينشر هذا التفاعل حرارة لأنه ناشر للحرارة.

شيء، فإن عليك أولاً أن تملك المال الكافي لشراء بطاقة اليانصيب. إلاّ أنه قد يكون بوسعك كسب جائزة اليانصيب دون أن تكلف نفسك عناء أمر شراء بطاقته؛ وهو ما يعني، إذا صح التشبيه، إذا ما تمكنت الجزيئات المتفاعلة من اختراق نفق من قاع بئر جهد إلى قاع بئر جهد آخر أكثر عمقاً ودونما حاجة إلى المرور فوق الحاجز (طاقة التنشيط) الكائن بين البئرين.

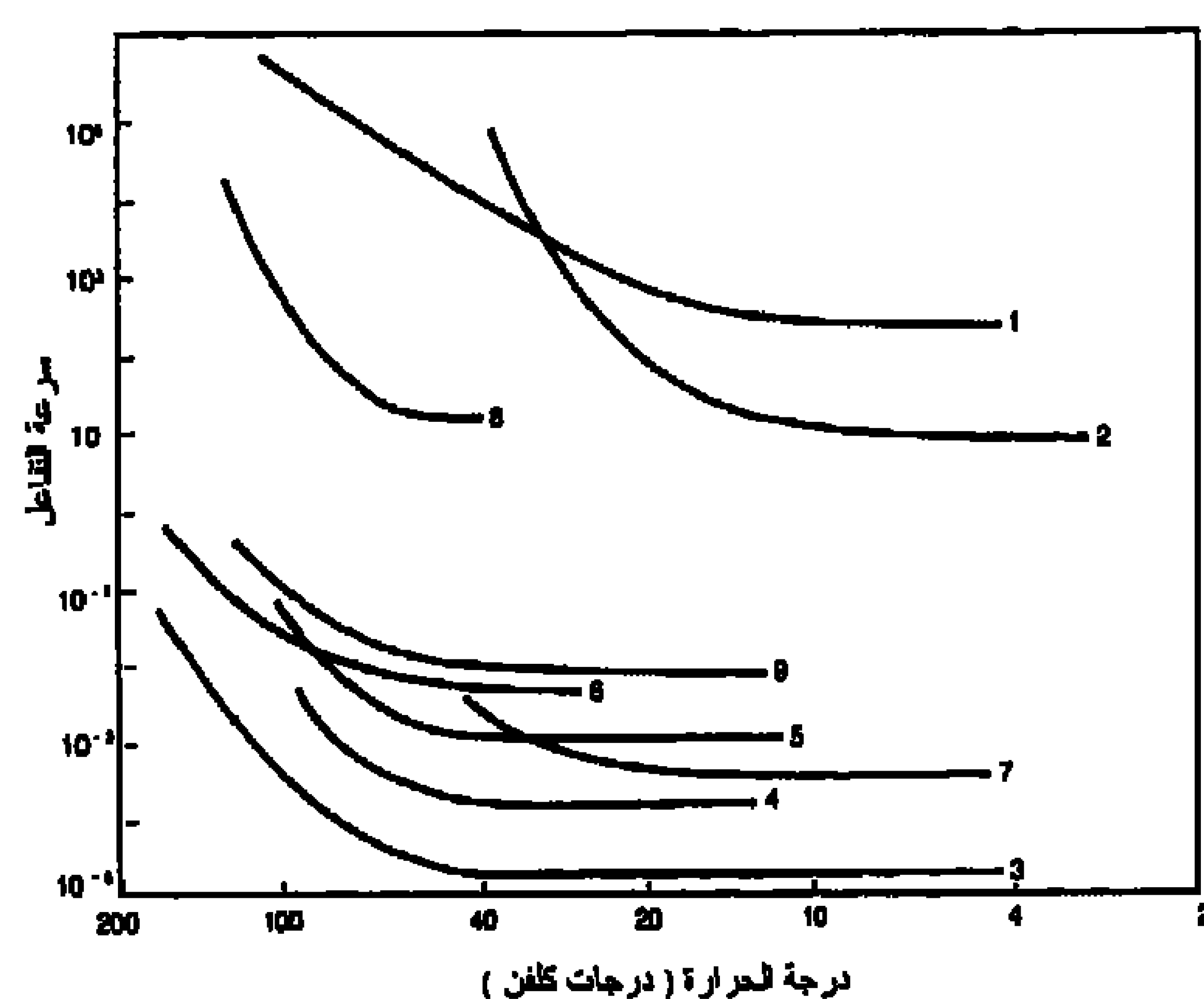
يعتبر عبور النفق نتيجة مباشرة لأحد المفاهيم الضمنية لنظرية الكم وهو مفهوم الطبيعة المثنوية (أي الجسيمية والموجية) للمادة والإشعاع. لا تلحظ المثنوية عادة في العالم الشاسع (الماكروي) المألوف، ولا يعني ذلك بطلانها، بل يعني فقط أنها تشغل مكاناً في النسق الخلفي من الاعتبار. أما في العالم المجهري (الميكروي)، أي في مجال التفاعلات الكيميائية، فإن هذا المفهوم يلعب دوراً هاماً، إذ يُحكِّم سلوك الدقائق، من ذرات وجزيئات، بخصائصها الموجية بصورة خاصة. ويكون خرقُ دقيقة ما نفقها الكمي عبر حاجز التنشيط أكثر احتمالاً، كلما كان عرض هذا الحاجز أصغر من طول الموجة المميِّز للدقيقة المعتبرة. وتشبه هذه الظاهرة ما يحدث عند سقوط حزمة ضوئية على سطح جسم معتم غير منفذ للأشعة، إذ ينعكس عليه جزء من الحزمة الساقطة، ويُمتص جزءٌ آخر منها فيه؛ وإذا ما كان هذا الجسم المعتم رقيقاً إلى درجة كافية، بدا الجزء الممتص من الحزمة على جانبه الآخر.

وقد حمل عام 1928 معه أحد الانتصارات المبكِّرة لنظرية عبور النفق وذلك عندما استخدمها «ج. كَاموف» George Gamow لتقديم تفسير كمّي لسرعات التحلّل الملاحظة في بعض العناصر المشعة. وفي غضون عام من ذلك، افترض «د. ج. بورجين» David G. Bourgin من جامعة ايلينوي أن حاجز تنشيط التفاعلات الكيميائية يمكن أن يُخترق بآلية النفق، وقدم «ر.ب. بل» Ronald P. Bell أثناء عمله في جامعة اكسفورد، إسهامات ذات شأن لفهم عبور النفق في التفاعلات الكيميائية، نذكر منها بخاصة، اشتقاقه لمعادلات تُقدِّر احتمالية نفاذ الدقائق عبر حواجز التنشيط ذوات الأشكال المختلفة. وقد تحققت توقعاته في التفاعلات الجارية في درجات الحرارة المرتفعة نسبياً التي تميز الطور المائع للمواد.

ومنذ عهد قريب وجه الباحثون اهتماماتهم نحو إبراز دور عبور النفق في التفاعلات الكيميائية الجارية في درجات حرارة منخفضة، حيث لوحظ أن عدد الانتقالات الناشئة عن شق نفق كمي عبر حاجز التنشيط، يربو على مثيله الذي يجتاز هذا الحاجز وفق مفهوم ارهينيوس. وقد أدخلت في مقالة كتبتها سنة 1959، مفهوم درجة حرارة عبور النفق، وهي درجة الحرارة التي يكون دونها عدد الانتقالات التي تتم أسفل الحاجز، أي عبر النفق، أكبر بكثير من مثيله الذي يتم فوق الحاجز، أي وفق نظرية أرهينيوس، حيث يفسح الميكانيك التقليدي المجال أمام نظيره الكمي.

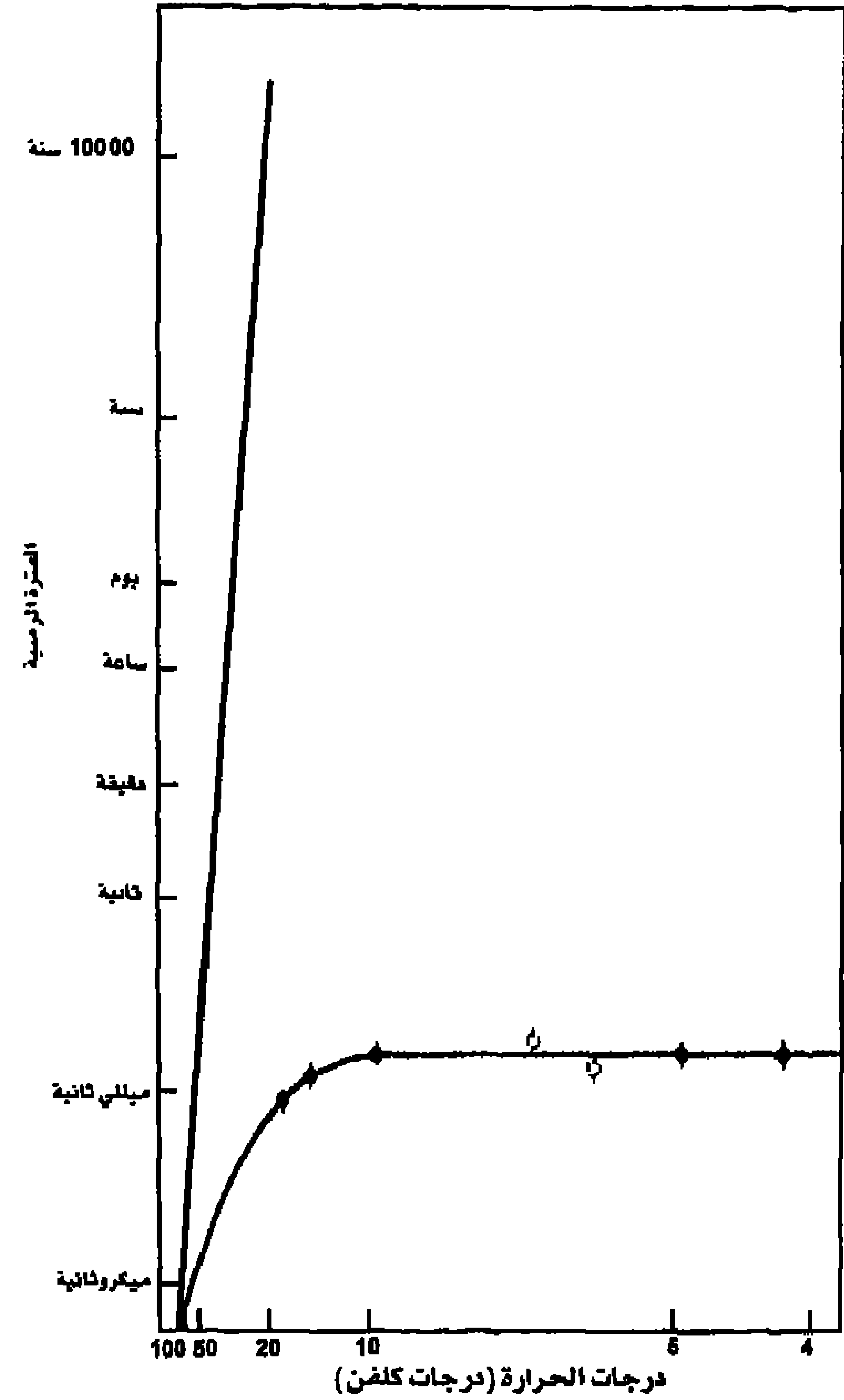


عبور النفق الجزيئي في حالة تعادي حد الألدهيد النملي (إلى اليمين والأعلى): يؤدي إلى تشكل سلسلة متماثرة (إلى اليسار والأعلى). يتكون الألدهيد النملي من ذرة أكسجين (O)، ومن ذرتي هيدروجين (H) مرتبطة كلها بذرة كربون (C). (لاتبدو ذرتا الهيدروجين على الشكل). يمثل المعقد المبين في منتصف الجزء العلوي، المرحلة المتوسطة من العملية التي تتضمن تحطم الرابطة المضاعفة بين ذرات الأكسجين وذرات الكربون حتى يتاح المجال أمام تشكل الروابط الأحادية (-C-O-C-O-) في المتماثر. ويبين الجزء الأسفل من الشكل آبار الطاقة الكامنة لكل مرحلة من مراحل التفاعل. ويؤدي تكرار هذه العملية إلى تزايد طول المتماثر.



تدل حدود سرعة التفاعل في درجة حرارة منخفضة على عبور النفق. وقد لوحظت مثل هذه الحدود في العديد من التفاعلات الكيميائية، مثل (1) تشكل سلاسل متماثر الألدهيد النملي (1973). (2) إعادة ارتباط أول أكسيد الكربون بالهيموغلوبين (1975). (3) تماكب (أو إعادة الترتيب البنيوي) الأزواج الجذرية في ثاني مثيل الكليوكسيم بعد تشعيعه بأشعة غاما (1977). (4و5) تجريد ذرات الهيدروجين بجذور الميثل، من الكحول المثيلي (4) والكحول الاثيلي (5) المجمدين (1977). (6) انتقال ذرات الهيدروجين خلال تماكب بعض الجذور (1979). (7) تشكل روابط كربون — كربون في بعض الجذور (1979). (8) برومة الاثيلين الهيدروجينية (أي إضافة بروميد الهيدروجين إليه) (1978) (9) كلورة كلوريد البوتيل بجزيئات الكلور (1980).

جمعت هذه المشاهدات من الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفييتي وكندا واليابان.



اصطناع المتماثر (البلمر): ويحتاج هذا الاصطناع، من وجهة نظر القانون الكيميائي التقليدي المعروف باسم معادلة أرهينيوس، إلى وقت متزايد عند درجات الحرارة المنخفضة (كما يشير الخط الأسود)، بحيث يصبح ذا قيمة لا متناهية عند درجة حرارة الصفر المطلق (درجة الصفر في سلم كلفن)، أي أن التفاعل يتوقف عند هذه الدرجة. إلاّ أن الأمر ليس كذلك، والزمن اللازم لمثل هذا الاصطناع هو زمن محدد (كما يشير المنحنى الملون): فالتفاعل يجري ولو ببطء، وكما يبدو هنا فإن مقدار الزمن اللازم لإضافة جزيء جديد إلى السلسلة المتشكلة يبقى ثابتاً ومساوياً حوالي 10 ميكرو ثانية وذلك في درجات الحرارة الأقل من الدرجة 10 كلفن. أخذت هذه القياسات في مخبر المؤلف.

لنفترض مثلاً، أن ارتفاع حاجز التنشيط يبلغ 0.4 إلكترون — فولط (وهي قيمة نموذجية لطاقة تنشيط العديد من التفاعلات الكيميائية)، وأن عرضه يبلغ 2 أنكستروم أي ما يقرب من قطر ذرة (أنكستروم واحد = 10^{-10} م)، عندئذ تبلغ قيمة درجة حرارة عبور النفق، محسوبة في حالة ذرة الهيدروجين، حوالي 160 درجة كلفن، وفي حالة ذرة الهيدروجين الثقيل (الدوتيريوم)، حوالي 120 درجة كلفن، كما تكون أدنى من ذلك في حالة الذرات والجزيئات الأخرى الأثقل، لأنها تتناقص متناسبة والجذر التربيعي لكتلة الدقيقة المعتبرة. ويفسر ذلك سبب إجراء التفاعلات الكيميائية عند درجات الحرارة القرّيّة (أي شديدة الانخفاض) إذا ما رغبنا بالحصول على ملاحظاتٍ قيّمةٍ من عبور النفق في هذه التفاعلات.

وهناك تأثير آخر يحدث أيضاً عند درجات الحرارة المنخفضة، إذ تتوجه سائر الجزيئات بالقرب من درجة الصفر المطلق نحو أدنى مستوى طاقة مسموح به وهو ما يعرف بمستوى طاقة نقطة الصفر: أي أنها تهبط نحو قاعدة حاجز التنشيط حيث تكون المسافة ما بين بئري الجهد أعظمية. ومع بقاء هذه المسافة محدودة، فإن احتمال اختراق النفق، مع انخفاض درجة الحرارة، يبلغ قيمة محددة ومستقلة عن هذه الدرجة. وعندها تبلغ سرعة التفاعل حدّها الذي تفرضه قوانين ميكانيك الكم عند درجة حرارة منخفضة.

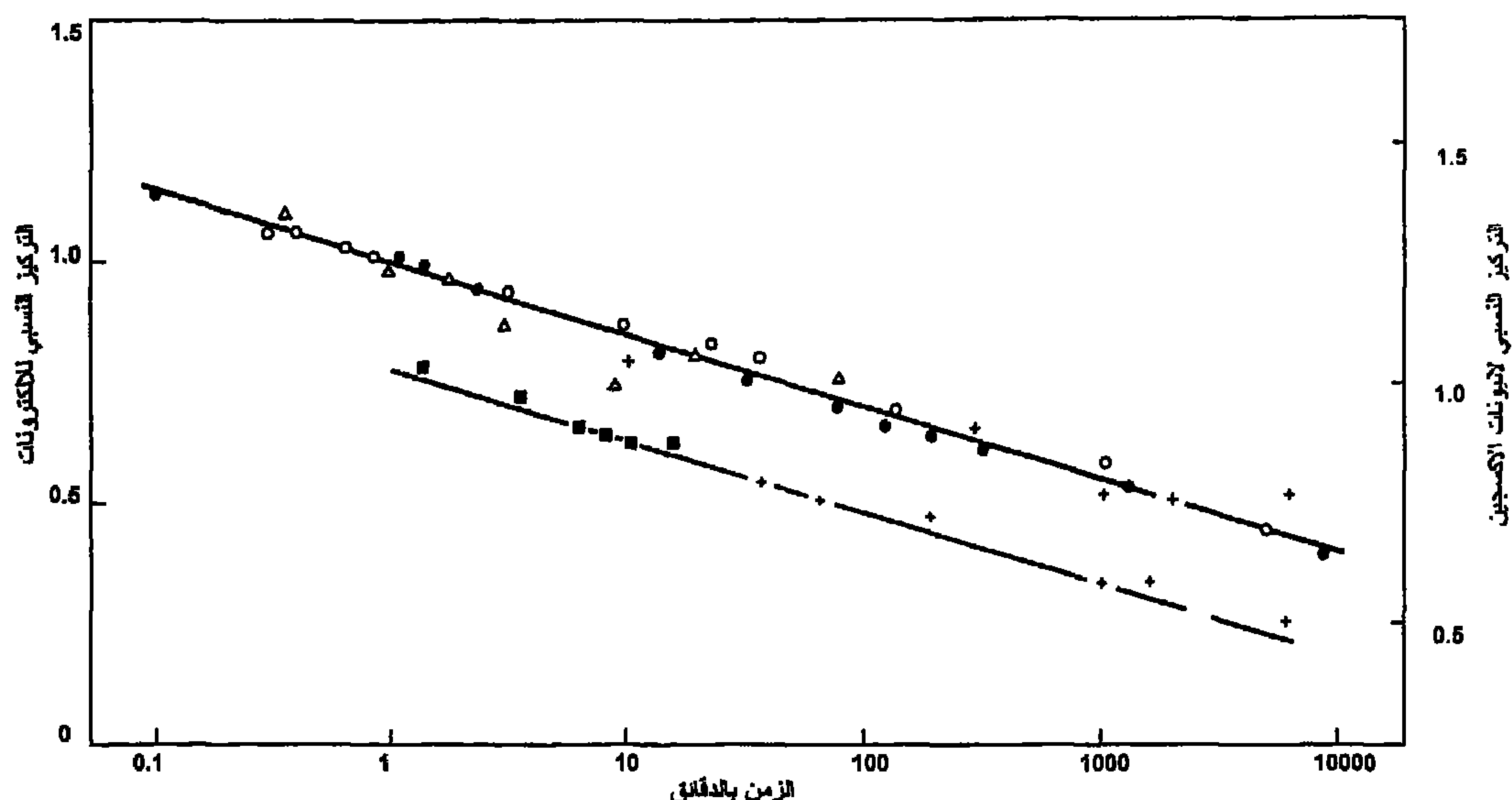
وقد استنتجت أيضاً وناقشت وجود مثل هذا الحد في مقالتي هذه التي كتبتها سنة 1959. وليس من الضروري أن تؤدي ظاهرة شق نفق عبر حاجز طاقة التنشيط، بحد ذاتها، إلى ظهور حد لسرعة التفاعل عند درجة حرارة منخفضة، إلاّ أن وجود هذا الحد يدل على تغلب تأثيرات ميكانيك الكم على تأثيرات الميكانيك التقليدي في درجات الحرارة المنخفضة، وعلى أن عبور النفق يلعب دوراً هاماً وحاسماً.

ونتساءل عن الدور الذي يلعبه هذا العبور في صنف هام من التفاعلات الكيميائية يعرف باسم تفاعلات الأكسدة والاختزال (الإرجاع).

تشكل هذه التفاعلات، ما يمكن أن يعد من أقدم فروع الكيمياء، ويمكن اعتبار حدوثها نتيجة لانتقال إلكترون من نوع كيميائي إلى نوع كيميائي آخر. تسمى الذرة أو الجزيء الذي يعطي الإلكترونات، الجسم المرجع أو المختزل أو مانح الإلكترونات، وتسمى الذرة أو الجزيء الذي يتقبل الإلكترونات، الجسم المؤكسد، أو متقبل الإلكترونات (وتعتبر الأحماض، بالمعنى العام، أجساماً مؤكسدة بينما تعد القواعد (الأسس) أجساماً مختزلة).

ولما كانت درجة حرارة عبور النفق تتناقص متناسبة والجذر التربيعي لكتلة الدقيقة التي تعاني هذا العبور، وكانت كتلة الإلكترون أصغر بحوالي 2000 مرة من كتلة البروتون، فإن من المتوقع أن تقرب درجة حرارة عبور النفق، في حالة الإلكترون، من 7000 درجة كلفن. يعني ذلك أن سائر تفاعلات الأكسدة والاختزال، يجب أن تحدث فقط عبر اختراق نفق. إلاّ أن الأمر ليس كذلك، ومرد ذلك إلى أن حركة الإلكترونات في تفاعلات الأكسدة والاختزال ترتبط بصورة واهية بحركة النواة الذرية (الأثقل بكثير منها)، بخلاف حركتها الحرة في المعادن وفي سواها من الأجسام الناقلة أو الموصلة.

يمكن تشبيه انتقال الدقائق في هذه العملية بحركة قطار مكون من قاطرة خفيفة، ترتبط بها مقطورة ثقيلة بواسطة رباط مطاطي مرن: يمثل الإلكترون القاطرة وتمثل النواة المقطورة. وعلى الرغم من أن بوسع الإلكترون أن يجتاز مسافة ما قبل أن تبدأ النواة بالتحرك، فإن الدقيقتين مرتبطتان معاً، لذلك ترتبط درجة حرارة



قيست سرعة تفاعل الأكسدة والاختزال في حالة تفاعل إعادة اتحاد الإلكترونات مع أيونات الأكسجين السالبة (أو انيونات الأكسجين)، (O^-) لتشكيل الأيونات السالبة (O^{2-}) ، (وهي نوع كيميائي ذو شحنة ثنائية سالبة)، واستُخدِم، مصدراً للإلكترونات اللازمة للتفاعل، محلول متجمد من هيدروكسيد الصوديوم المتأين. وقد أمكن الاستدلال على تشكل الأيونات السالبة (O^{2-}) عندما لوحظ أن سرعة تناقص تركيز الإلكترونات (الخط الأسود) تساوي سرعة تناقص تركيز الأيونات السالبة (O^-) (الخط الملون). (وقد أعيدت إلى حالتها العيارية تراكيز المواد المتفاعلة محسوبة على أساس قيمها الابتدائية. كما أزيح التمثيل الرأسي بعض الشيء لتجنب التغطية بين المنحنيين). تتوافق الرموز المختلفة والقياسات المجراة في درجات حرارة مختلفة مأخوذة في المجال الواقع ما بين الدرجتين 120 و 4.2 كلفن. إن ثبات سرعة إعادة الاتحاد في كل هذا المجال، يدل على أن التفاعل قد سار عبر النفق، لأنه، لو سار عبر الطريقة التقليدية، لأمكن ملاحظة تناقص سعته بانخفاض درجة الحرارة.

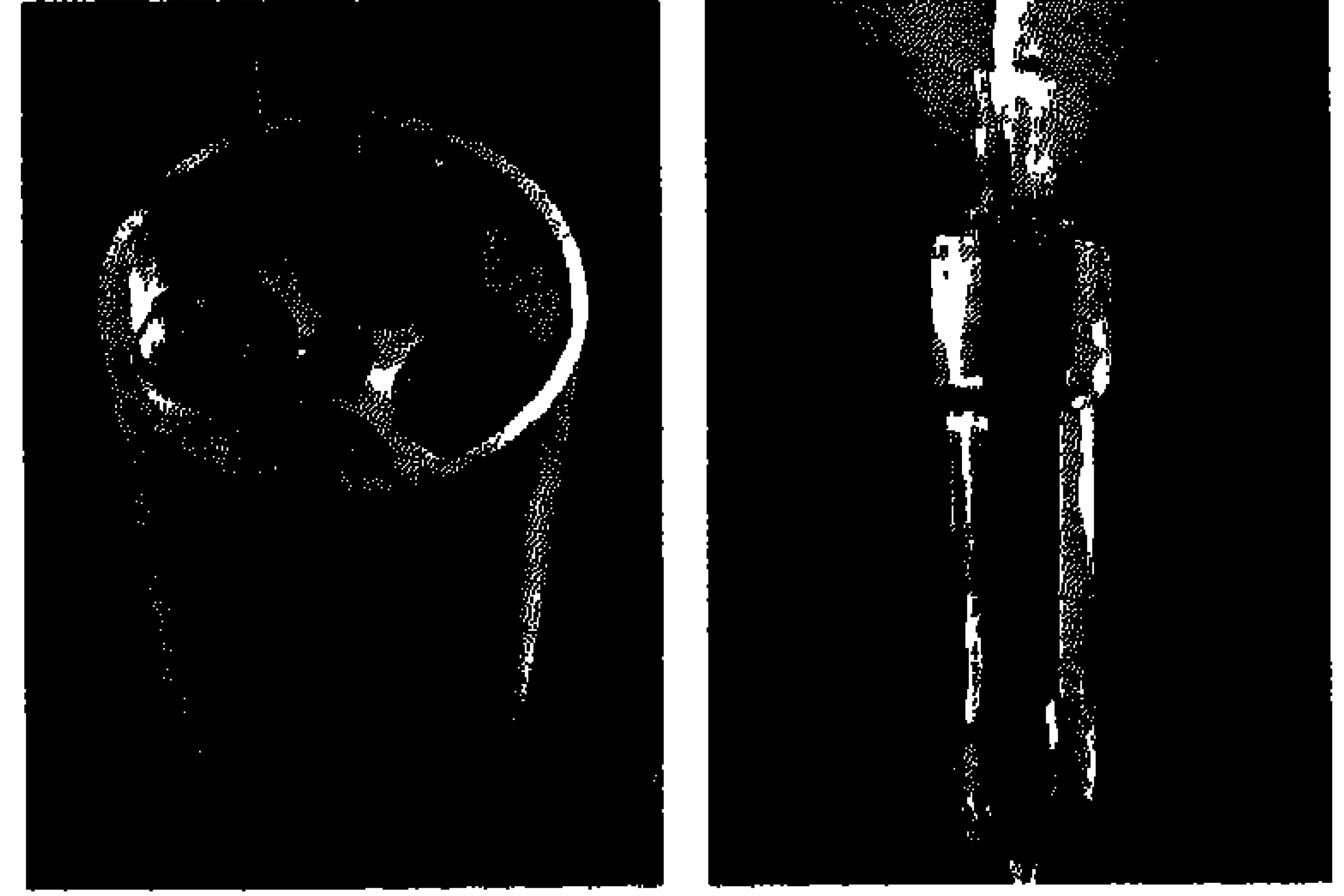
عبور النفق الخاصة بالإلكترون بكلٍ من كتلته وكتلة النواة، وتقع لذلك فيما دون الدرجة 2000 كلفن.

وأول دليل لا يرقى إليه الشك عن الدور الهام الذي تلعبه ظاهرة النفق في تفاعلات الأكسدة والاختزال في درجات الحرارة المنخفضة، هو ما قام به «ب. تشانس» Britton Chance و «د. س. سي فولت» Don De.C. Vault من جامعة بنسلفانيا عام 1966، فقد أكسدا السيتوكروم C (أي زوّداه بألكترونات) عبر اختزال الكلوروفيل (أي نزع إلكترونات منه). والسيتوكروم C أنزيم ينقل الإلكترونات إلى الأكسجين الجزيئي من خلال معاناته عمليات تأكسد واختزال متناوبة.

وقد وجد الباحثان أن سرعة التفاعل تستوي في حوالي الدرجة 120 كلفن، وتبقى بعد ذلك ثابتة حتى أدنى درجة حرارة عملا بها، وهي درجة حرارة الهيليوم السائل أي 4.2 درجة كلفن، وحسبا طاقة التنشيط فبلغت 0.14 إلكترون فولط، كما حسبا المسافة التي قطعها الإلكترون عبر النفق فبلغت 30 انكستروماً تقريباً. وتتوافق هذه المسافة والبعد الخطي لكريّة (أي لكرة صغيرة) من البروتين.

وقد قمت في معهد الفيزياء الكيميائية في موسكو، وزملائي «ك.أ. زاماريف» Kiril I Zamarayev و «أ.إ. ميخائيلوف» Alpha I. Mikhailove و «ر.ف. كايروت دوينوف» Ravil F. Khaitutdinov بتجريات على عدد كبير من تفاعلات الأكسدة والاختزال التي تخترق الإلكترونات فيها نفقاً ما بين أيونات (شوارد) متباعد بعضها عن بعض ببضع عشرات من الأنكسترونات. ودرسنا تفاعل إعادة اتحاد الإلكترونات بأنيونات الأكسجين (O^-) (أي بأيونات الأكسجين السالبة) لتشكيل الأيونات (O^{2-})، واستخدمنا، مصدراً للإلكترونات، محلولاً متجمداً من هيدروكسيد الصوديوم المتأين، وأثرنا التفاعلات بتشعيع المحلول، وراقبنا وتتبعنا تشكل (O^{2-}) باستخدام تقنية الرنين (الطنين) الإلكتروني البارامغنطيسي، وهي تقنية مشابهة لتقنية الرنين النووي المغنطيسي، تُراقب فيها استجابة الإلكترونات في مجال مغنطيسي لترددات إشعاعات متميزة. وقد لاحظنا أن سرعة تشكل الأيونات (O^{2-}) ظلّت ثابتة في مجال درجات الحرارة الواقع ما بين الدرجتين 120 و 4.2 كلفن، مما يدل على أن التفاعل قد سار مخترقاً النفق، وقدّرنا أن طول المسار عبر هذا النفق يتراوح ما بين 30 و 40 انكستروم. كما درسنا أيضاً أمثلة أخرى، لتفاعلات أكثر تميّزاً، عن تأثير النفق في تفاعلات الأكسدة والاختزال.

عرضنا فيما تقدم حادثة انتقال الإلكترونات فقط عبر النفق، إلا أن التفاعل الكيميائي، بكل ما تدل عليه هذه الكلمة من معنى، هو عملية تتم فيها إعادة ترتيب الذرات، كما تحدث فيها تغيرات في طبيعة روابط التكافؤ التي تجمع فيما بينها، وكذلك في أطوال هذه الروابط وفي الزوايا الكائنة فيما بينها.



المساعر: وهي أجهزة تقيس كميات الحرارة المنتشرة أو الممتصة خلال تفاعل ما، استخدمت في مخبر كاتب هذه المقالة لتعيين سرعة تماثر الألدهيد النملي في درجات حرارية قرية (منخفضة). وقد أثبت الجهاز المبين رسمه إلى يسار الشكل، فعاليته في مجال درجات الحرارة الواقع ما بين درجتي 350 و 80 كلفن، يبرز في أقصى يسار حجرة المسعر إناء زجاجي يحوي وحيدات حد الألدهيد النملي. يوضع الجهاز بكامله، أثناء إجراء التجربة، في وعاء أكثر سعة منه، ويبرد بالنتروجين السائل.

أما المسعر الذي يبدو على يمين الشكل، فقد استخدم في مجال درجات الحرارة المنخفضة حتى الدرجة (4.2 كلفن)، تملأ المنطقة الخارجية في هذا الجهاز بالنتروجين السائل، وتملأ المنطقة الداخلية بالهليوم السائل.

طوّر هذين الجهازين كل من «إ.م. باركالوف» Igor M. Barkalov، و «إ. م. كابلان» Anatolii M. Kaplan و «د. ب. كيريكين» Dmitrii P. Kiryukhin في معهد الفيزياء الكيميائية في موسكو. وأشرف كاتب المقالة على إجراء التجارب.

وقد توصلت وزملائي في معهد الفيزياء الكيميائية في موسكو «إ.م. باركالوف» Igor M. Barkalov و «أ. م. كابلان» Anatolii M. Kaplan و «د. ب. كيريكن» Dmitrii P. Kiryukhin إلى اكتشاف وجود حدّ سرعة التفاعل الذي تفرضه قوانين ميكانيك الكم عند درجة حرارة منخفضة. ودرسنا تشكل السلاسل الجزيئية الطويلة بدءاً من جزيئات الألدهيد النملي المنفردة (CH_2O)، وحرّضنا عملية تشكل هذه السلاسل وتناميها باستخدام حزم من الإلكترونات عالية الطاقة المتشكلة في مسرع للدقائق، وكذلك باستخدام أشعة كاما (وهي اشعاعات ذات طاقة مرتفعة) الصادرة عن ذرات من الكوبلت المشعّ 60، ولاحظنا أنه ما إن يبدأ تفاعل تنامي السلاسل، حتى يتتابع تلقائياً ودونما حاجة إلى بذل أية حرارة إضافية، لأن هذه التفاعلات، بذاتها، ناشرة للحرارة.

وعملنا في مجال واسع من درجات الحرارة المنخفضة يتراوح ما بين الدرجتين 140 و 4.2 كلفن، وتمكنّا من تحديد سرعة التفاعل، بقياس كمية الحرارة المنتشرة وذلك باستخدام جهاز خاص يقوم بدور المسعر. ووجدنا أن بإمكاننا تشكيل سلاسل جزيئية طويلة جداً من الألدهيد النملي «أحادي الحد» Monomère، أو جزيء الألدهيد المنفرد. ففي الدرجة 140 كلفن تتشكل السلاسل من حوالي 10 ملايين وحدة من وحدات أحادي الحد. وفي الدرجة 77 كلفن تشكلت السلاسل من حوالي 100000 وحدة من هذه الوحدات، أما عند الدرجة 4.2 كلفن فتشكّل منها ما يتراوح بين 1000 أو 2000 من هذه الوحدات. كما أن متوسط الزمن اللازم لإضافة رابطة جديدة على السلسلة المتنامية، يزداد، في مجال درجات الحرارة الأعلى من 140 كلفن بتناقص درجة الحرارة، وفقاً لما تدل عليه معادلة أرهينيوس التقليدية. أما في مجال درجات الحرارة الأدنى بكثير من درجة 140 كلفن، فإن زيادة قيمة هذا المتوسط الزمني تتباطأ تدريجياً مع انخفاض درجة الحرارة حتى تصل إلى جزء من مئة جزء من الثانية عند الدرجة 12 كلفن، حيث تدرك سرعة التفاعل حدها الذي تفرضه قوانين ميكانيك الكم عند درجة حرارة منخفضة، وتكون قيمة هذه السرعة في الدرجة 4.2 كلفن أكبر بـــ 110 مرات مما يمكن أن تدل عليه معادلة أرهينيوس.

وجاءت نتائجنا متوافقة تماماً والصورة التي تشير إلى أن تفاعل جزيئات الألدهيد النملي المنفردة إنما يتم عبر نفق، حيث يعبر أحد هذه الجزيئات، نفقاً من بئر جهد ضحلٍ نسبياً (أي قليل العمق)، ناجم عن تداخله مع جزيئات مجاورة، إلى موقع متاخم ذي بئر جهد أعمق. ويشكل هذا الجزيء العابر للنفق، الوصلة النهائية أو الطرفية لسلسلة الألدهيد النملي، حيث يبرز بوضع طاقيٍّ أكثر ثباتاً يرافقه تحرر فانتشار طاقةٍ مقدارها 0.4 إلكترون فولط.

يمكن تشبيه عملية تنامي سلاسل الألدهيد النملي بعبور النفق، بعملية الانشطار التلقائي، إذ، كما يُظهر التحليل النظري لتلك الظاهرة، يكون احتمال اختراق حاجز الطاقة متناسباً طرداً مع عرض الحاجز والجذر التربيعي لارتفاعه وكذلك الجذر التربيعي لكتلة الدقيقة المعنية.

ولما كان من الممكن مقارنة كتلة النوع الكيميائي المتفاعل بكتلة شظية انشطار نووي، وكان ارتفاع حاجز الطاقة، في حالة تفاعل كيميائي تقليدي، أقل بحوالي 10 ملايين مرة تقريباً عما هو عليه في حالة تفاعل انشطار نووي، وكان عرض الحاجز في مثل ذلك التفاعل الكيميائي أكبر بحوالي 3000 مرة تقريباً مما هو عليه في حالة تفاعل الانشطار النووي، فإن تأثيري ارتفاع الحاجز وعرضه يتعادلان أبما بينهما لأن الجذر التربيعي لـــ 10 ملايين يساوي تقريباً 3000. وبالتالي يمكن، وعلى نحو غير متوقع مقارنة احتمال مرور الألدهيد النملي عبر النفق مع احتمال حادثة الانشطار النووي.

إلاّ أن صورة ما يجري في الواقع تكون أكثر تعقيداً مما رسمت: فموقع جزيء الألدهيد النملي المجاور للطرف المفتوح من السلسلة المتنامية ليس ثابتاً تماماً، وبوسع هذا الجزيء أن يتأرجح بين مواقع جيرانه الأقرب، وغالباً ما تتم إضافة الجزيء الجديد إلى السلسلة في اللحظة التي يكون فيها الجزيء ما قبل الأخير فيها

أكثر ما يكون قرباً من نهايتها، إذ يأخذ عند ذلك، كلٌ من ارتفاع حاجز التنشيط وعرضه، قيمته الدنيا.

وعلى العكس من ذلك فإن احتمال تشكل رابطة جديدة يتضاءل كثيراً إذا ما أخذ الجزيء ما قبل الأخير موقعاً بعيداً عن طرف السلسلة لأن ارتفاع حاجز التنشيط وعرضه عندئذ يكونان كبيرين جداً، كما تكون تواترات الانتقالات التي تتم فوق الحاجز أو عبر النفق أقل بكثير. هذا وقد لاحظت بوضوح وزملائي في التجارب التي أجريناها في معهد الفيزياء الكيميائية، تأثيرات مثل هذه التذبذبات أو التأرجحات البطيئة نسبياً التي تجري ما بين الجزيئات، ودرسنا التفاعل، المثار إشعاعياً، الذي يجري بين بروميد الهيدروجين و الأثيلين. ووجدنا أن استبدال الدوتيريوم بالهيدروجين يحدث انخفاضاً مقداره أربع مرات في قيمة سرعة التفاعل في درجات الحرارةْ القريبة من درجة حرارة عبور النفق، علماً بأنه إذا جرى التفاعل بين جزيئات ثابتة ومستقرة فستكون قيمة هذا الانخفاض من مرتبة 100000 مرة.

ويمكن لظاهرة النفق المخففة بالحركات التي تتم ما بين الجزيئات أن تلعب دوراً هاماً في تأدية البروتينات والأحماض النووية (DNA) وظائفها الحيوية. ويمكن أن نلحظ آثار هذا الدور ليس فقط في مجالات درجات الحرارة المنخفضة، بل أيضاً عند درجات حرارة تزيد على الدرجة 200 كلفن، وحتى عند درجات الحرارة الفيزيولوجية. كما يسهم هذا العبور بشكل خاص إسهاماً فعّالاً في عمليات التحول والانتقال التي تجري بين الحالات التحتية التمثيلية (أي الحالات التحتية العائدة لتمثيلات مختلفة) لجزيئات المتماثرات (البلمرات) الحيوية. توافق هذه الحالات التحتية التمثيلية، تشكيلات للجزيء مختلفة قليلاً بعضها عن بعض، إلاّ أن لها طاقات متكافئة تقريباً، حيث يمكن لذرة ما مثلاً، أو لمجموعة من الذرات، أن تدور حول رابطة أحادية في الجزيء، ويفسر الانتقال أو التحول، ما بين هذه الحالات التحتية، حركية جزيئات المتماثرات الحيوية، وقد يكون متضمناً أيضاً في أداء هذه الجزيئات وظائفها الحيوية.

وقد اكتشف الحالات التحتية التمثيلية وتحرّى عن خصائصها كلٌ من «هـ. فراونفلدر» Hans Frauenfelder وزملاؤه في جامعة الينوي في أوربانا وفي جامعة ولاية وين، و «د. فيليبس» David Philips وزملاؤه في جامعة أوكسفورد. واستخدم الفريقان في دراساتهما تقنيات مثل تقنية التحليل بانعراج الأشعة السينية. كما أجريت وزملائي وبالتعاون مع «ر. موسباور» Rudolf Mössbauer و «ف. باراك» Fritz Parak من جامعة ميونيخ التقنية، دراسات وتحريات حول هذه الحالات التحتية. وقادت دراسة الانتقالات التي تجري فيما بينها إلى التعرف على نماذج ديناميكية جديدة للبنية التركيبية للبروتينات وسواها من المتماثرات (البلمرات) الحيوية.

فقد افترض الفيزيائي المرموق «إ. شرودنكر» Erwin Schrödinger منذ حوالي 40 سنة في كتابه «ما هي الحياة؟» What is life? أن البروتينات هي بلورات غير منتظمة، أو ذات بنية غير دورية. وقدم باحثون آخرون منذ حوالي عشرة أعوام فكرة أخرى تعتبر البروتين مكوناً من قلب، أو لب، شبه صلب محاط بقشرة شبه سائلة تشكل معظم حجم كريّة البروتين. أما المفهوم الثالث والأحدث فيعتبر البروتينات، وكذلك «حمض الدنا» DNA (الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين)، حالات زجاجية غير متجانسة، كما يعتبر أن الانتقالات أو التحولات التي تتم بين حالاتها التحتية التمثيلية، التي تحدث في درجات الحرارة المنخفضة أو حتى تلك التي يحتمل حدوثها عند درجات الحرارة الأعلى من 200 كلفن، هي في الحقيقة أمثلة وشواهد على عبور النفق.

ولابد أخيراً من ذكر ملاحظتين حول بعض التأثيرات الأخرى لهذه الظاهرة: فعلى الرغم من أنها تلعب دوراً في تشكيل الروابط الكيميائية، إلا أن بوسعها أيضاً أن تلعب مثل هذا الدور في تخريب هذه الروابط، وبالتالي في تحطيم المركبات. يرجع ذلك إلى حدوث عبور النفق، عبر حواجز التنشيط، الذي يحول دون عمليات تخريب المركبات (أي أن العبور يتم في الاتجاه المعاكس الذي يحصل أثناء تشكل المركبات).

ومن جهة أخرى فإن سماح هذا العبور بحدوث التفاعلات الكيميائية عند درجات الحرارة شديدة الانخفاض يقدم سبباً أو مبرراً آخر للشك بإمكانية إعادة الحياة إلى الكائنات الحية التي تعرضت للتجمد لفترة طويلة، إذ يجب وعلى أقل تقدير، حماية ووقاية هذه الكائنات مما يمكن أن يحرِّض على حدوث التفاعلات الكيميائية فيها، مثل الأشعة النفوذة.

وأخيراً فإن المعطيات التجريبية والاعتبارات النظرية الخاصة بتبيان ظاهرة عبور النفق في التفاعلات الكيميائية ، تشهد، كما يشهد العديد من تطبيقات كيمياء الكم في مجال البرودة الشديدة، على أن علم الكيمياء لم يتدنَّ ليكون تابعاً لعلمي الفيزياء والبيولوجيا، بل ظل، كما كان دوماً، الشريك الند في طرح وتبادل الأفكار الأساسية الجديدة.



اكتشاف هايك كامرلنك أونز للموصلية الفائقة

إن السباق، الذي واكب أفول هذا القرن، للوصول إلى درجات حرارة تقارب الصفر المطلق قاد إلى اكتشاف غير متوقع للتيارات التي تسري من دون مقاومة

(ب.دو أوبوتر)

تعتبر الموصلية الفائقة - التي تعني اختفاء المقاومة في تيار كهربائي - واحدة من أغرب ظواهر الطبيعة. ففي الشهر 1987/3، التقى مئات من العلماء في تجمع عالمي فيما دعاه البعض «مهرجان وود ستوك للفيزياء»[1] في قاعة الرقص بفندق هلتون في مدينة نيويورك لتسلُّم تقارير عاجلة عن الموصلية الفائقة عند درجات حرارة أكثر ارتفاعاً مما كان قد سُجِّل قبل ذلك على الإطلاق. وقبل ذلك بثلاثين عاماً وضع (ج. باردين) و(ن.ل. كوبر) و(ج.ر. شريفر) الأساس النظري الذي فسّر بشكل جيد الموصلية الفائقة. وفي خضم البحث عن النظرية وعن المواد التي تتمتع بالموصلية الفائقة عند درجات حرارة أعلى، كاد يُنسى العمل الذي قام به الفيزيائي التجريبي اللامع (هايك كامرلنك أونز) مكتشف الموصلية الفائقة.

كان أونز رجلاً شغوفاً بالبرودة، ومما لا شك فيه أن حضوره إلى استوكهولم في ذلك اليوم البارد من الشهر 1913/12 لتسلم جائزة نوبل في الفيزياء أضاف إلى فرحته متعة وبهجة. لقد كان هدفه البحثي الأول أن يصف بصورة كمية سلوك الغازات عند درجات حرارة شديدة الانخفاض، ولقد قاده البرنامج التجريبي، الذي مكّنه من الوصول إلى درجات أخفض، إلى اكتشاف الموصلية الفائقة.

ولد أونز في كروننجن بشمال شرقي هولندا عام 1853، كان والده صاحب مصنع لصناعة القرميد المستخدم في الأسقف. لكن مزاج والدته ذا النزعة الفنية كان له على ما يبدو تأثير في العائلة. وقد أصبح أخوه وابن أخته رسامَيْن مرموقين، وتزوجت أخته من الفنان المشهور (ف. فرستر) من مدينة ليدن، أما أونز فكان يهوى الشعر وهو فتى. ويمكن العثور على آثار النزعة الشعرية عند أونز في شعار مختبره، Door meten tot Weten: الذي يعني «التجربة طريق إلى المعرفة» Through Measurement to Knowledge. إلا أن عبقرية أونز لم تتأجج إلا بمثابرته ومتابعته الأخيرة في فيزياء درجات الحرارة المنخفضة.

[1] مقارنة بالتجمع العالمي الذي أقيم في قرية وود ستوك في أمريكا لمغني البوب.



يقف هايك كامرلنك أونز أمام الجهاز الذي يستخدمه لإيصال الهيليوم إلى جوار الصفر المطلق ومن ثم إسالته. وكنتاج جانبي لهذا البحث للوصول إلى حرارة مفرطة في الانخفاض، اكتشف أونز مصادفة ظاهرة أطلق عليها اسم «الموصلية الفائقة» وفي السنوات الأخيرة، رفعت الموصلية الفائقة عند درجات حرارة متزايدة باستمرار من التوقعات في التوسع بإمداد السوق بالنبائط التي تستغل هذه الظاهرة.

وفي عام 1870 دخل اسم أونز في سجلات جامعة كروننجن لدراسة الفيزياء. كان أونز يستمتع بالسفر والترحال على ما يبدو، وتجلى ذلك في انتقاله إلى جامعة هايدلبرك في ألمانيا في السنة التالية، حيث درس مع الكيميائي (ر. بنزن) - وهذا الاسم مألوف لدى كل من أشعل مصباح (أو موقد) بنزن في مختبر الكيمياء بالمدارس الثانوية - والفيزيائي (ج. كرشوف) و في عام 1873



فني مشغول في بحث وهو يفحص ملفاً مغموراً في سائل الآزوت رخيص الثمن عند درجة حرارة تبلغ 77 كلفن.

عاد أونز إلى كرونجن، حيث دافع بعد خمس سنوات عن أطروحته في الدكتوراه، التي كانت حول تأثير دوران الأرض في نواس قصير. وتزعم التقارير أنه لدى إعطاء الحكم النهائي على ذلك الدفاع اندفعت لجنة التحكيم بالتصفيق.

وعندما كان أونز على وشك الانتهاء من عمله في تحضير الدكتوراه تعرّف (د.ج. فاندر فالس)، الذي صار بعدئذ أستاذاً للفيزياء في جامعة أمستردام. لقد كان سلوك الغازات معروفاً على وجه التقريب منذ القرن السابع عشر، عندما بيّن العالم الأنكلوإيرلندي (ر. بويل) أن الضغط يتناسب عكسياً مع الحجم عند أي درجة حرارة معطاة. وكانت المعادلات الناتجة التي تصف سلوك غاز ما تنطبق على غاز مثالي تخيلي لا تشغل جزيئاته حجماً ولا يؤثر الواحد منها في الآخر بأي قوة. وعندما تقدمت تقنيات القياس، بدأ الكيميائيون والفيزيائيون يلاحظون انحرافات عن سلوك الغازات المثالية.

بدأ فاندر فالس يطور وصفاً مترابطاً (منسجماً) للغازات الحقيقية، آخذاً بعين الاعتبار الفراغ الحقيقي الذي تشغله جزيئات الغاز الحقيقي، وكذلك القوى التي تؤثر بها بعض هذه الجزيئات في بعضها الآخر. وفي عام 1873 نجح في صياغة قانون فاندر فالس، الذي يصف سلوك الغاز الحقيقي لغازات منفردة، وبعد سبع سنوات نشر قانونه للحالات المقابلة: وهو معادلة واحدة تدخل في الحسبان سلوك جميع الغازات الحقيقية. وعلى الرغم من أن عمل أونز في الميكانيك كان نموذجياً، فإنه وجد نفسه أكثر اهتماماً بالانقياد وراء فاندرفالس والتحري عن سلوك الغازات.

التسلسل نحو الهيدروجين السائل

في عام 1882 عُيّن أونز أستاذاً للفيزياء بجامعة ليدن. وعلى الرغم من أن التقنيات الكمية كانت القاعدة في أبحاث الميكانيك والكهرمغنطيسية فإن الدراسات عن المادة فضلاً عن القوى كانت في الأغلب كمية تماماً. ومن ثم فقد شرع أونز في وضع تحليل كمي شامل حيث كانت الدقة الرياضياتية أمراً جوهرياً بالنسبة للمسائل العلمية التي يهتم بها.

لقد كانت الطريقة الوحيدة لاختبار أفكار فاندرفالس هي قياس سلوك الغازات في شروط مفرطة. فعند درجات حرارة مفرطة في الانخفاض، على سبيل المثال، ينحرف جزيء غاز معين عن قوانين الغاز المثالي بشكل أعظم، متبعاً بدلاً من ذلك توقعات فاندرفالس للغازات الحقيقية. إن الحاجة إلى شروط تبريد مفرطة قادت أونز إلى تأسيس مختبر لدرجات الحرارة المنخفضة (مختبر قرّي). وفي عام 1932 أعيد تسمية المنشأة باسم مختبر كامرلنك أونز كما أن الحاجة المقابلة إلى حرفيين مهرة كي يبدعوا أجهزة معقدة وحساسة ضرورية لعمل التبريد قادته إلى تأسيس جمعية تدريب لصانعي الأجهزة. تمكنت هذه المدرسة ضمن الجامعة من تخريج الفنيين المهرة لدرجة عالية، ومن بينهم نافخو الزجاج الذين سيصنعون الأجهزة له وللعديد من الباحثين في أنحاء العالم.

وفي عام 1877 نجح كل من الفيزيائي الفرنسي (ل.ب. كيليتيت) والعالم السويسري (ر.ب. بيكتيت) على حدة في إسالة (تمييع) الأكسجين والآزوت. وقبل ذلك الإنجاز، كان العديد من العلماء يفترضون بأن تلك الغازات، إضافة إلى الهيدروجين، ربما كانت خارج نطاق الإسالة (على الرغم من أن الهيليوم كان قد شوهد في الطيوف الشمسية، فإن ذلك الغاز لم يكتشف على الأرض إلا بحلول عام 1895). كانت المشكلة تتمثل في الوصول إلى درجات حرارة مفرطة في الانخفاض تلزم لتكثيف هذه الغازات. وكانت كميات السائل التي سينتجها كيليتيت وبيكتيت صغيرة جداً، لكن أونز كان يحتاج إلى مقادير أكبر ليتابع بحثه.

وخلال عام 1892 نجح أونز في تطوير جهاز قادر على إنتاج كميات كبيرة من السائل. استفادت المنظومة مما صار يدعى العملية المتسلسلة Cascade Process، وهي سلسلة من الغازات بدرجات حرارة تكثيف أخفض، تُضغط وتبرّد إلى نقطة السيولة ثم تترك لتتمدد، ويقوم البخار القادم من السائل المتبخر بتبريد البخار المضغوط الذي يليه في السلسلة. ابتدأ أونز بكلوريد الميتيل، الذي يتكثف عند الدرجة 21+ سيلزية تحت ضغط يساوي خمسة ضغوط جوية (5atm)، فكثف على التتابع الإيثيلين (87- درجة سيلزية عند ضغط يساوي ثلاثة ضغوط جوية 3atm) ثم الأكسجين (145- درجة سيلزية عند ضغط 17atm)، وأخيراً الهواء (193- درجة سيلزية وضغط قدره 1atm).

أما من أجل إسالة الهيدروجين فإن درجة الحرارة اللازمة ستكون قريبة بشكل ملحوظ من الصفر المطلق، مما يجعل بناء الجهاز أكثر حساسية، وبموجب القوانين التي تحكم سلوك الغاز المثالي عند حجم ثابت ، فإن الضغط ينخفض مع انخفاض درجة

الحرارة. ونظرياً يصبح الضغط صفراً عند الدرجة 273.15 - سيلزية (وإن تكن الغازات الحقيقية قد تم إسالتها قبل ذلك). تعين هذه الدرجة من الحرارة صفر على مقياس (سلم) كلفن، وتدعى الصفر المطلق لأنها أخفض درجة حرارة يمكن التوصل إليها.

وفي عام 1898 تفوق الفيزيائي الاسكتلندي (ج. ديوار)، الذي يعمل في مجال درجات الحرارة المنخفضة، على أونز في إسالة الهيدروجين مستفيداً من ظاهرة ترموديناميكية تعرف باسم تمدد جول - طومسون: في هذه الظاهرة تتغير درجة حرارة غاز، هابطة نحو الأسفل في الغالب، لدى تمدد الغاز عبر صمام. لقد استُعمل تمدد جول - طومسون كجزء من العملية المتسلسلة، فقد جعلها ديوار رئيسية لمسعاه في إسالة الهيدروجين، لأنه إذا ما برد إلى حرارة دون 80 درجة ستنخفض أكثر . (ومن اللافت للنظر أن نرى الهيدروجين يسخن إذا ما ترك يتمدد عند درجات حرارة أعلى من 80- سيلزية الأمر الذي يفسر تسمية هذه النقطة بدرجة حرارة الانقلاب) وبهذه الطريقة نقل ديوار الهيدروجين إلى درجة إسالته البالغة 253- سيلزية أو 20 كلفن.

لم ينتج جهاز ديوار سوى كميات قليلة من الهيدروجين السائل. وقد لا تكون تلك النتيجة مخيبة لآمال أونز. ومع ذلك، ففي الوقت الذي كان الدافع لأعمال أونز هو مراقبة سلوك الغاز عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق. وعلى الرغم من ذلك فإن أونز هو الذي صار يعرف «بسيّد الصفر المطلق».

كان أونز مهتماً بإنتاج كميات من الهيدروجين السائل أكبر بكثير من الكميات التي أنتجها ديوار، وهذا أحد الأسباب التي جعلته لا يُقدم على إسالة الهيدروجين إلا بعد مضي ثماني سنوات على إسالة ديوار له. وكان هناك عامل آخر هو مجتمع ليدن المذعور، ففي عام 1807 وأثناء احتلال نابليون لهولندا، انفجرت سفينة ذخيرة في قنال بوسط ليون. شُيد مختبر أونز على أنقاض الجزء المدمر من المدينة. وفي عام 1896 عندما اكتشف مجلس المدينة أن المختبر يشتمل على كميات لا بأس بها من الهيدروجين المضغوط (وهو غاز قابل للاحتراق بشدة) وكانت الذكريات التاريخية لانفجار السفينة لا تزال ماثلة في ذاكرة المجلس، هب مذعوراً، وعينت السلطات هيئة لدراسة القضية. ولكن على الرغم من وجود فاندرفالس في تلك الهيئة ووجود رسالة من ديوار تناشد المجلس أن يسمح باستمرار البحث، فقد أوقف عمل أونز على الهيدروجين لمدة سنتين.

الهيليوم يصبح الجائزة

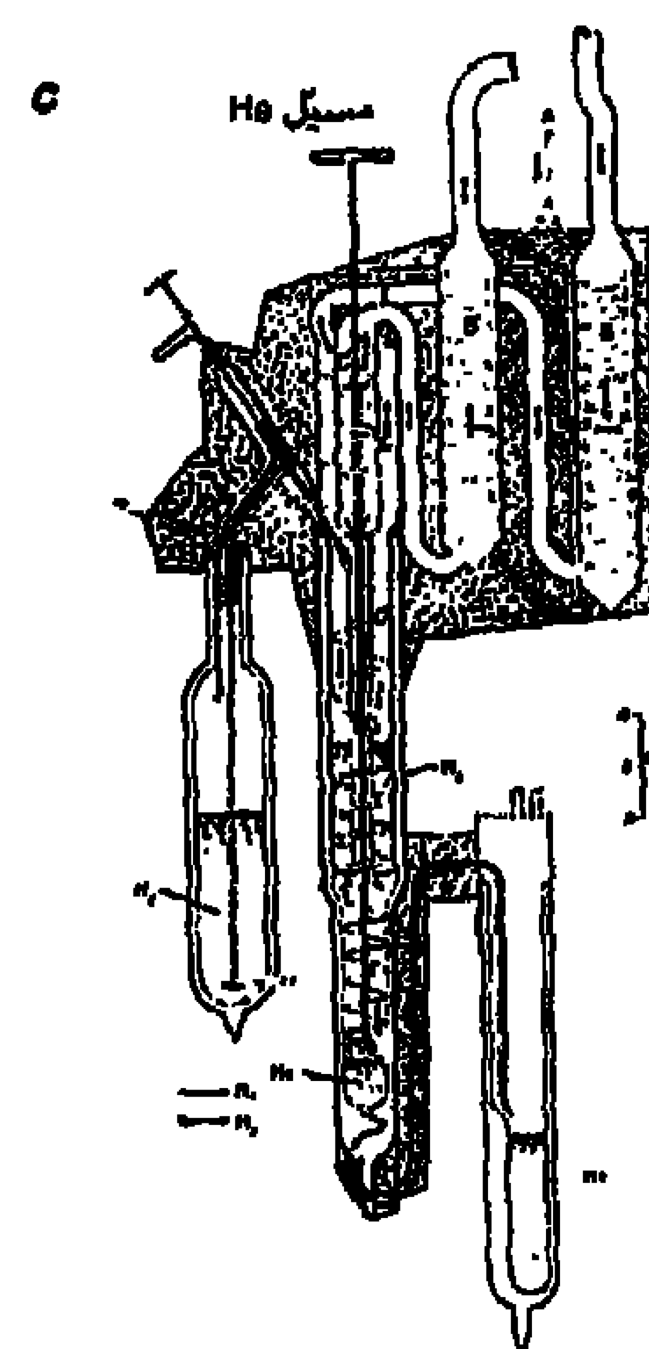
مع حلول عام 1906 كان أونز وفريقه قد طوروا جهازاً قادراً على إنتاج كميات كبيرة نسبياً من الهيدروجين السائل من خلال تمدد جول طومسون بضغط غاز الهيدروجين، ثم إمراره عبر منطقة مبردة بالهواء السائل وبعد ذلك يُسمح له بالتمدد، وبهذه الوسيلة يتم تبريد الهيدروجين تبريداً يكفي لإسالة جزء منه على الأقل. هذا ويتم جمع أي هيدروجين غازي متبق وإعادته إلى المنظومة لإجراء محاولة أخرى. وفي البداية استطاع الجهاز أن ينتج أربعة لترات من الهيدروجين السائل في الساعة الواحدة، وبعد إجراء تحسينات لاحقة وصل إنتاجه إلى 13 لتراً.

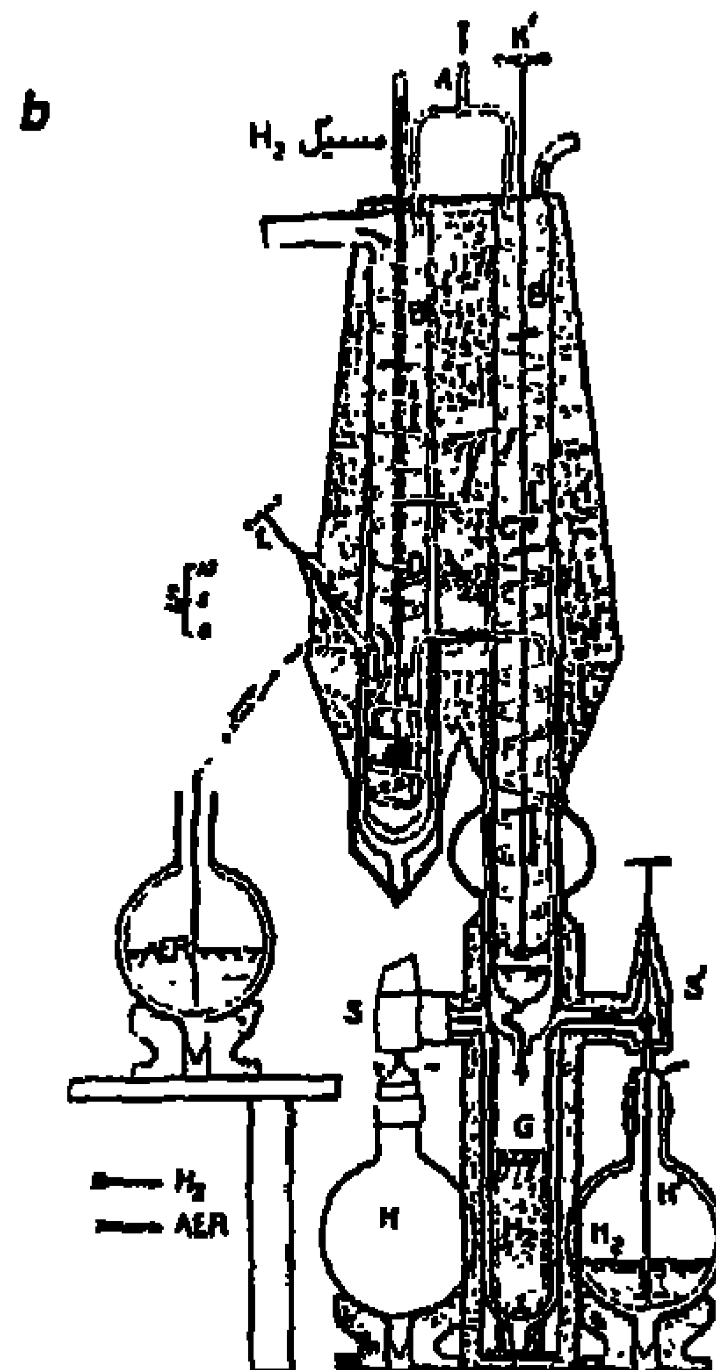
وفي عام 1895، وبينما كان أونز وديوار يحاولان إسالة الهيدروجين، اكتشف (و. رامزي) في إنكلترا الهيليوم على الأرض. والهيليوم أخف الغازات الخاملة، فالقوى التي تؤثر بها ذراته بعضها في بعض ضعيفة جداً، وتلك التفاعلات الضعيفة هي السبب في انخفاض درجة تكثيفه إلى هذه الدرجة المنخفضة جداً. وبعد أن كان البحث والكفاح منصباً على الهيدروجين السائل صار الآن منصباً على الهيليوم السائل. وقد كتب أونز قائلاً: «لقد عزمت على أن يكون هدفي المباشر هو المضي إلى نهاية الطريق».

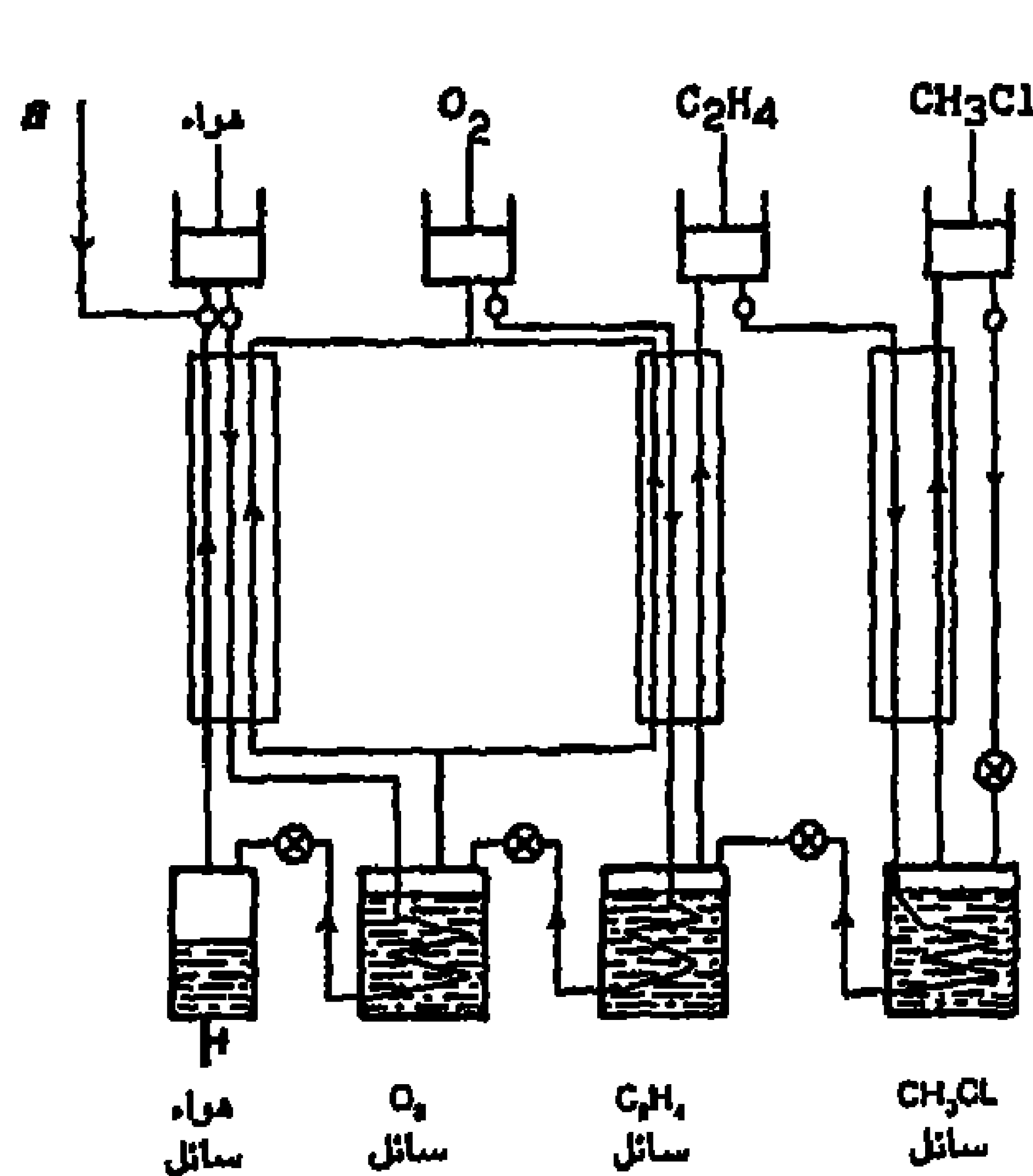
كانت الخطوة الأولى هي الحصول على كمية كافية من غاز الهليوم المكتشف حديثاً. ولحسن الحظ فقد كان شقيق أونز يعمل مديراً لمكتب الاتصالات التجارية في أمستردام، وكان باستطاعته تدبير كميات كبيرة من رمل المونازايت Monazite الذي يحتوي على الهيليوم، والمطلوب شراؤه من كارولينا الشمالية. وقد تمكن أونز من استخلاص نحو 300 لتر من غاز الهليوم (عند ضغط قدره 1atm) من شحنة الرمل.

كان توافر إمدادات الهيدروجين السائل هو مفتاح محاولة إسالة الهيليوم. فقد قام أونز بتصميم جهاز جديد مستخدماً هواء سائلاً ثم في النهاية هيدروجينياً سائلاً كمبردات. ومرة أخرى جُرِّب تمدد جول - طومسون لتكثيف الهيليوم والحصول على بضع قطرات نفيسة (ثمينة) من السائل. وتم بناء المنظومة وبدأت العمل يوم 1908/7/10، وانتشر النبأ في أرجاء الجامعة وتجمع بعض العلماء ليشاهدوا ما حدث.

وفي عصر ذلك اليوم تدفق غاز الهيليوم في الدارة، ولكن سائل الهيليوم لم يشاهد حتى المساء. ولم ينخفض مقياس الحرارة دون درجة 4.2 كلفن. وتصادف وجود أستاذ في الكيمياء هو (ف.شراينميكرز) في المكان، فاقترح أن توقُّف قراءة ميزان الحرارة عن الهبوط ربما يعود لأن الهيليوم السائل كان هناك بالفعل مسبقاً، لكن رؤيته كانت صعبة. وشرع أونز بإضاءة وعاء التجميع من الأسفل. وروى أونز فيما بعد أن هذه اللحظة كانت رائعة، فسطح الهيليوم السائل يصبح فجأة واضحاً على جدار زجاج وعائه كطرف سكين، وأنه كاد يطير فرحاً وسروراً وهو يتيح لفاندرفالس فرصة رؤية الهيليوم السائل. ومع إنقاص الضغط تمكن أونز من خفض درجة الحرارة إلى 1.7 كلفن مقترباً من الصفر المطلق لتلك الأيام. وقد استخدموا موازين حرارة تعمل بغاز الهيليوم لقياس تلك الدرجات من الحرارة المفرطة الانخفاض. (عند حجم ثابت وضغط منخفــض، يسلك الهليوم في ميزان الحرارة ســلوكاً قريباً جداً من







جهاز متسلسل (a) بناه أونز في عام 1892 يستطيع أن ينتج لتراً من الهواء السائل في الساعة. كان الهواء السائل ضرورياً لتشغيل مسيّل الهيدروجين (b) الذي صنعه بإتقان عام 1906. ينتقل غاز الهيدروجين عبر المنظومة إلى حمام من الهواء السائل ومن ثم إلى صمام تمدد في النهاية. يسمح لغاز الهيدروجين بالتمدد ويتحول إلى سائل. يجمع الهيدروجين السائل، في حين يعاد الغاز إلى الضاغط طوّر أونز أول مسيل للهيليوم (c) في عام *1908*.

سلوك الغاز المثالي الخيالي مما يسمح بقياس درجة الحرارة، ومعروف أن حاصل ضرب الضغط في الحجم يتناسب مع درجة الحرارة، وعليه فإن قياس الضغط عند حجم ثابت يصبح مقياساً لدرجة الحرارة).

وعلى مدى السنوات الثلاث التالية كرس أونز نفسه لتطوير جهاز أفضل لاستعمال الهليوم السائل في البحث. فمجرد نقل السائل من الوعاء الذي يتكثف فيه الهليوم إلى وعاء تخزين يشكل تحديات تقنية كبيرة. وأخيراً، وفي عام 1911 أصبحت كريوستات (قريّات)[2] Cryostat الهليوم التي تحافظ على السائل عند درجة حرارة منخفضة ثابتة، جاهزة لدراسة سلوك المواد عند درجات حرارة الهليوم السائل.

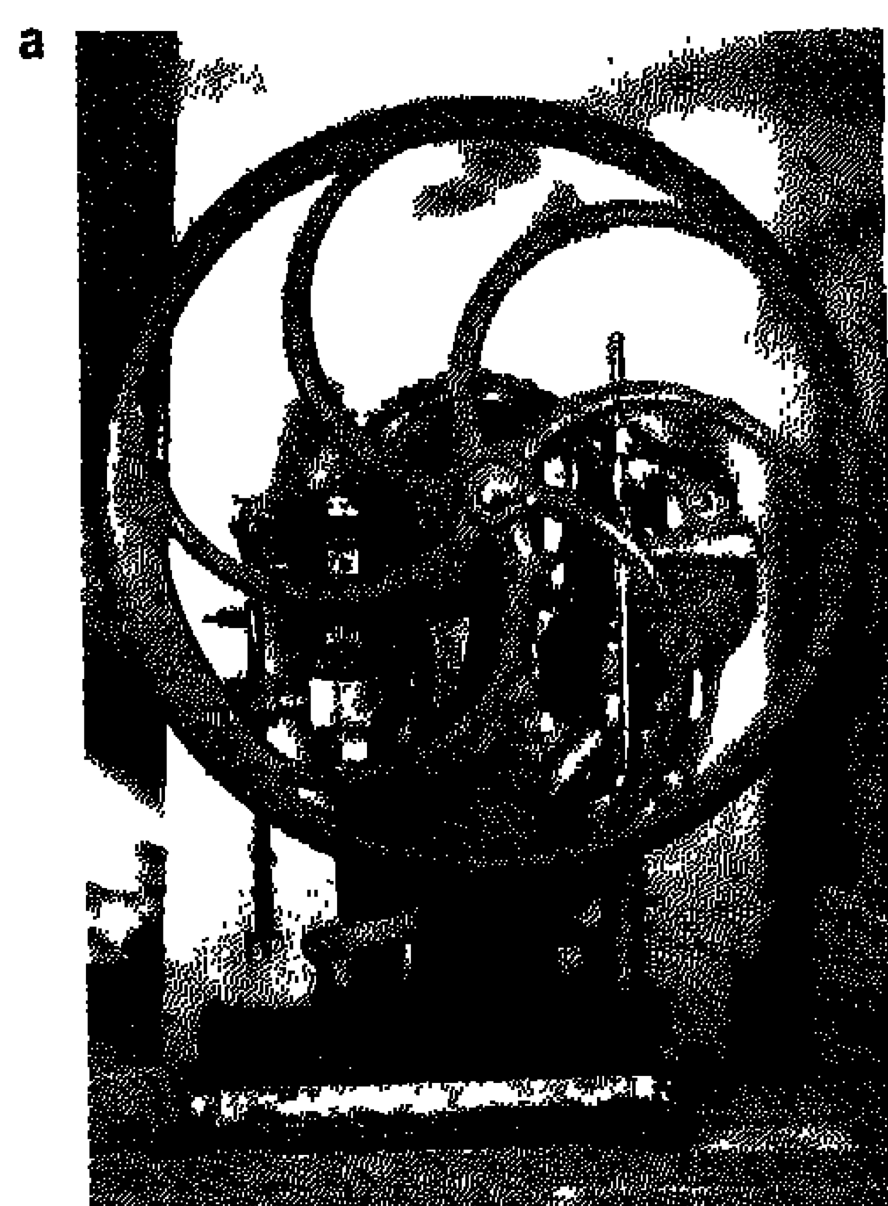
البرودة والتيار

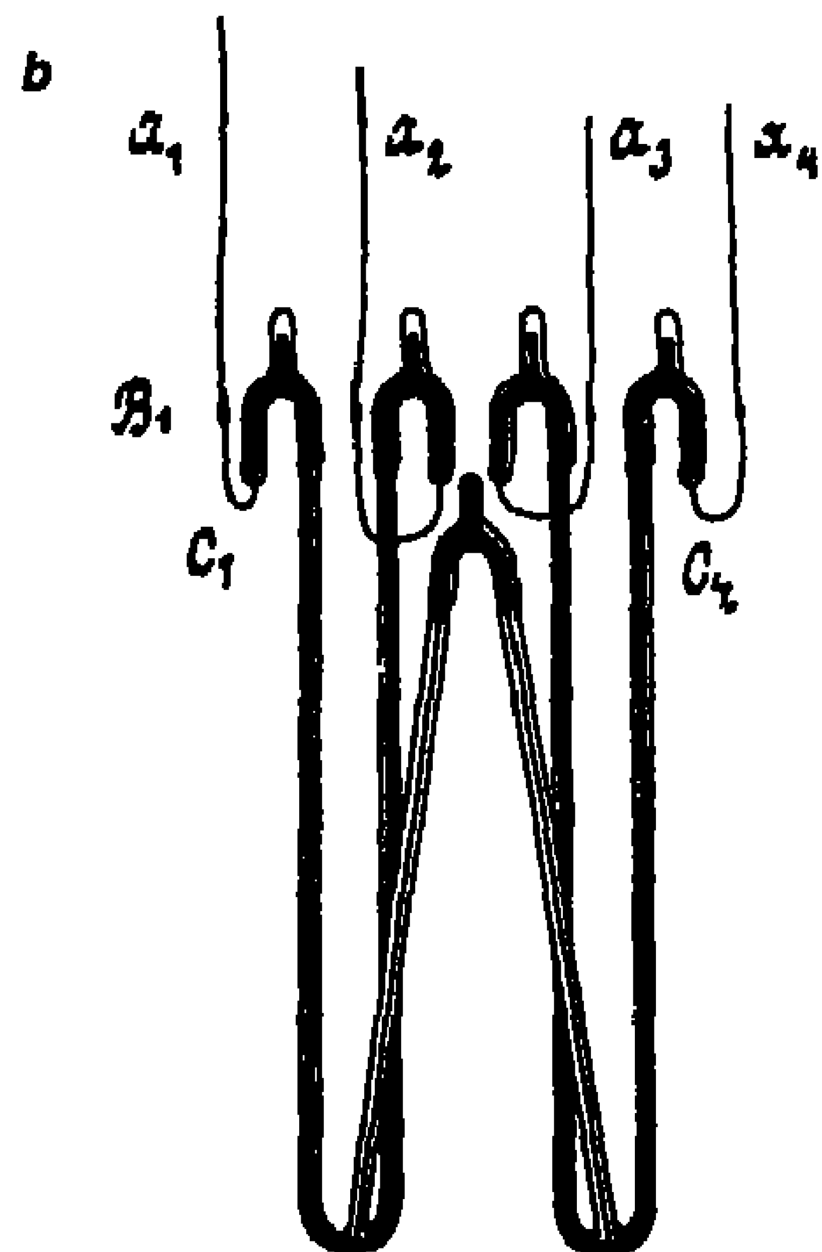
كان من المعروف جيداً في ذلك الحين أن المقاومة الكهربائية في معدن تتناقص مع درجة الحرارة، بيد أن ما يمكن أن يحدث فعلاً للمقاومة عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق كان مثاراً للجدل والمناقشات الحامية. فاللورد كلفن كان يعتقد بأن جريان الإلكترونات، الذي يتحسن مع تناقص درجة الحرارة كما دلت عليه المقاومة الأخفض، قد يتوقف نهائياً، إذ تصبح الإلكترونات متجمدة في مواضعها. وهكذا فالمقاومة عند درجة الصفر المطلق ستكون عالية بلا حدود. وأما أونز وديوار وغيرهما فقد افترضوا أن التناقص في المقاومة مع هبوط درجة الحرارة سيستمر باطراد، حتى يصل في النهاية إلى الصفر عند نقطة درجة الصفر. (في عام 1905 بيّن (و.هـ. نرست) في ألمانيا أن قوانين الترموديناميك تمنع الوصول إلى الصفر المطلق تجريبياً. وقد تم الوصول إلى درجات حرارة وصلت إلى 0.00001 كلفن). إن ما حدث فعلاً كان مذهلاً، إذ قدم في عام 1911 فهماً للمادة على المستوى الذري لم يكن متوقعاً إطلاقاً.

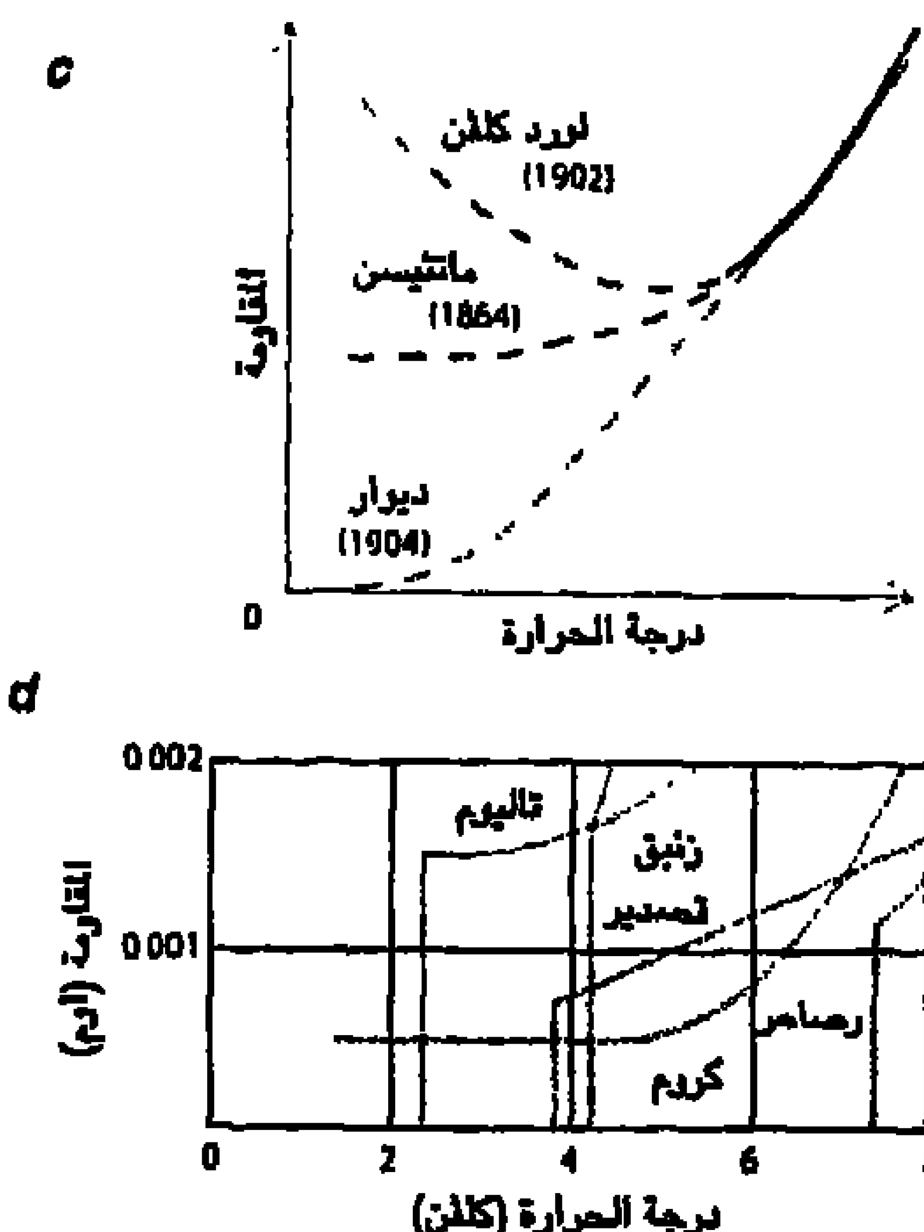
ولما كان وجود الشوائب في معدن ما يمكن أن يعيق التيار الكهربائي ويؤدي إلى تشوش النتائج التجريبية، فقد قرر أونز أن يتعامل مع الزئبق. واستطاع أن يقطر الزئبق السائل مراراً وتكراراً عند درجة حرارة الغرفة، وبذلك حصل على عينة شديدة النقاوة لتجاربه في درجات الحرارة المنخفضة. كان الزئبق معبأ في أنبوب شعري من الزجاج على شكل الحرف U، وله قطبان في طرفيه يمكّنان من قياس التيار المار فيه وهو لا يزال سائلاً. وأخيراً بُرِّد الزئبق حتى صار سلكاً صلباً. وقد وجد فريق أونز التناقص النظامي المتوقع في المقاومة عند جميع درجات الحرارة المقيسة. أما عند درجات الهليوم السائل والتي لا تزال أعلى بصورة محسوسة عن الصفر المطلق، فقد بدا وكأن المقاومة اختفت نهائياً.

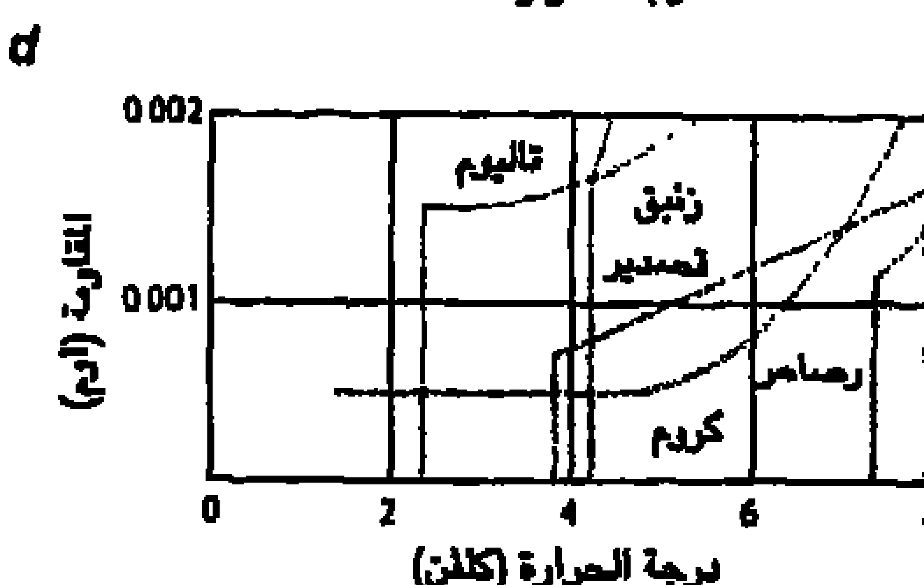
وقد أنجز هذه التجارب أونز و(ج.فليم) الذي يعمل رئيساً للكادر الفني، والعاملان معهما (ج. هولست) و(س. دورسمان). وكان أونز وفليم معنيين بجهاز توليد درجات الحرارة المنخفضة الذي كان يبرد فيه الزئبق، في حين جلس هولست ودورسمان في غرفة مظلمة تقع على بعد 50 متراً، يسجلان قراءات المقاومة من مقياس غلفاني.

[2] تُستعمل لتهيئة أوساط درجاتُ حرارتها بالغة الانخفاض وفي ظروف متحكم فيها.









إن ضاغط كيليتيت (a) — اخترعه (ل.ب. كيليتيت) الذي أسال الأكسجين والآزوت — كان مفيداً إلى أبعد الحدود بالنسبة لأونز أثناء بحثه نظراً لعدم فقد أي غاز أثناء الانضغاط أو التمدد، فقد كان الجهاز ملائماً للعمل بغازات نقية ومكلفة. ويظهر في الشكل (b) أنبوب شعري على شكل الحرف W فيه سلك من الزئبق لدى اختبار مقاومة الزئبق عند درجات حرارة منخفضة. قبل أن يبدأ أونز تحقيقاته وتحرياته، كان السلوك المتوقع للمعادن (c) مختلفاً تماماً عما وجده في الواقع. اكتشف أونز أن الهبوط الحاد في المقاومة (d) يصاحب درجات حرارة متناقصة للزئبق ولعدد من المعادن الأخرى.

وحديثاً، قام (ج. دي نوبل) (وهو باحث في مختبر درجات الحرارة المنخفضة في ليدن) بإعادة تقييم القصة التي سمعها من فليم عندما وصل إلى هناك في عام 1931 وهو فتى (من البديهي، أن يكون المرء حذراً في أخذ هذه التقييمات بصورة حرفية، بسبب مرور زمن طويل عليها، ولأن القصة منقولة عن ثلاثة). أشارت جميع المحاولات المتكررة إلى مقاومة صفرية عند درجات حرارة الهليوم السائل. وقد افترض العاملون أن يكون قصر ما في الدارة هو المسؤول عن ذلك واستبدلوا بالأنبوب U أنبوباً آخر على شكل الحرف W مزوداً بأقطاب عند طرفيه وعند الانحناءات (الفتلات) ليتوفر بذلك أربعة أجزاء مختلفة للتجربة. وفي هذه المرة أيضاً كانت المقاومة صفرية ولم يعثر على أي قصر في الدارة أو أي جزء منها.

واستمر هؤلاء بإعادة التجربة. وكان هناك طالب من مدرسة صانعي الأجهزة مكلف بمراقبة قراءات مقياس الضغط الموصول بالجهاز. وكان ضغط بخار الهليوم في الكريوستات يحتاج إلى تخفيض قليل عن الضغط الجوي لكي يستطيع الهواء أن يندفع من خلال أي شق أو ثقب من الثقوب الرفيعة، فيتجمد ثم يغلق تلك الثقوب. وأثناء إحدى التجارب أعطى الطالب إيماءة. ارتفع الضغط ببطء، كما ارتفعت درجة الحرارة. وعندما مرت درجة الحرارة بالدرجة 4.2 كلفن، رأى هولست قراءات المقياس الغلفاني تقفز فجأة عندما عاد ظهور المقاومة.

وحسب رواية دي نوبل كان هولست قد ساعد عن غير قصد، التحول الذي آل إليه الزئبق من سلوكه من التوصيل الطبيعي إلى الحالة التي يرغب أونز في أن يسميها الموصلية الفائقة والعكس.

وقد أقنعت المحاولات المتكررة أونز بأن الفقد المفاجئ لمقاومة الزئبق عند الدرجة 4.2 كلفن كان حقيقة. نشر أونز اكتشافه في الشهر 1911/11 بالصيغة «حول التحول المفاجئ في معدل اختفاء مقاومة الزئبق». وجاءت الاختبارات اللاحقة لكل من القصدير والرصاص فبينت أن الموصلية الفائقة كانت صفة تتمتع بها معادن عديدة إذا بُرِّدت تبريداً كافياً.

ومع حلول عام 1914 وطّد أونز تياراً دائماً أو ما دعاه تياراً فائقاً مستمراً A Persist Supercurrent في ملف (وشيعة) من الرصاص فائق التوصيل. وضع الملف في الكريوستات عند درجة حرارة منخفضة، حيث حرض التيار بوساطة حقل مغنطيسي خارجي. ومع غياب المقاومة، كانت الإلكترونات في الملف حرة في مواصلة تدفقها بصورة غير محدودة. وبعد أن رأى الفيزيائي النمساوي - الألماني (ب. إيهرنفست) التيار، كتب إلى الفيزيائي الحائز جائزة نوبل (هـ. لورنتز) في هولندا: «إنه لأمر خارق أن نرى تأثير هذه التيارات (الدائمة) في إبرة مغنطيسية. ويمكنك أن تلمس بصورة حسية واقعية كيف تدور حلقة الإلكترونات في سلك مرات ومرات، ببطء ومن دون احتكاك».

لكن أونز أصيب بخيبة أمل عندما اكتشف أنه يمكن إخماد الموصلية الفائقة بوساطة حقل مغنطيسي ولو ضئيل. كانت تلك الحساسية تعني أنه لا يمكن أن تمر إلا تيارات صغيرة في المواد فائقة التوصيل على الرغم من فقدان المقاومة - أي إن الحقول المغنطيسية المرافقة للتيارات لها شدة كافية لإخماد الموصلية الفائقة. وظلت هذه المشكلة هي العقبة الكبرى أمام التطبيقات العملية لاكتشاف أونز طوال حياته. وكان لابد من مرور نصف

قرن قبل أن تكتشف مواد وتتم معالجتها بطرق تسمح بالحصول على تيارات كبيرة مع حقول مغنطيسية مرافقة لها. إن نبائط (أدوات) التصوير بالرنين المغنطيسي (MRI) التي أضحت الدعامة الأساسية للطب التشخيصي كانت أفضل التطبيقات المهمة المعروفة للتقدم الذي طرأ على الموصلية الفائقة في النصف الثاني من القرن الحالي.

وفي عام 1926 توفي هايك كامرلنك أونز. إن جميع إنجازاته متميزة علماً بأنه كان يعاني التهاب الشعب الهوائية، الأمر الذي أجبره على ترك المختبر فترات طويلة للاستشفاء في سويسرا. لكن غيابه الجسدي ظاهرياً لم يمنعه من قيادة العاملين في مختبره - بل حتى إن الموت لم يوقفه. وحسب أسطورة من ليدن تقول بأن مراسيم جنازته طالت أكثر مما هو متوقع، مرغمة الموكب على الإسراع عبر المدينة ليصل في الوقت المحدد للدفن بالقرب من قرية فورشوتن. وعندما كان الموكب مسرعاً قيل إن فليم علّق قائلاً «ذلك هو الرجل العجوز بلا ريب – يجعلنا الآن نركض حتى بعد موته».

وعلى الرغم من أن الموصلية الفائقة ظلت مجالاً للبحث العلمي الذي لا يقدم عليه إلا نخبة قليلة فإن أونز كان خلال حياته يعتقد اعتقاداً راسخاً بأن التيار الذي لا يعاني أي مقاومة سيفسح المجال في النهاية أمام صنع عدد كبير من الأجهزة العملية. وتعد القطارات المرفوعة في الهواء وخطوط نقل الكهرباء ذات الموصلية الفائقة مثالَيْن لأكثر التطبيقات الممكنة التي ذكرت باستمرار. وإن متابعة البحث لاكتشاف مواد جديدة ذات موصلية فائقة عند درجات حرارة أكثر ملاءمة قد تجعل من اكتشاف أونز جزءاً من الحياة اليومية.

المؤلف

Rudolf de Bruyn Ouboter

أستاذ الفيزياء التجريبية في مختبر كامرلنك أونز بجامعة ليدن في هولندا. تشمل أبحاثه فيزياء درجات الحرارة المنخفضة، ولاسيما خواص الموصلات الفائقة والهليوم العائل الميوعة ونبيطة وصلة جوزفسون الميزوسكوبية. وعندما لا يقوم بالأبحاث أو بتدريس الفيزياء، فإنه يكرس نفسه لتاريخ العلوم.

مراجع للاستزادة

The Quest For Absolute Zero: The Meaning Of Low - Temperature Physics. Kurt Mendelssohn. Taylor and Francis. 1977.

Superconductivity: Discoveries During The Early Years Of Low Temperature Research At Leiden 1908 - 1914. Rudolf de Bruyn Ouboter in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag - 23, No. 2, Pages 355 - 370; March 1987.

The Path Of No Resistance: The Story Of The Revolution In Superconductivity. Bruce Schechter. Simon & Schuster. 1989.

Superconductivity: The Next Revolution? Gianfranco Vidali. Cambridege University Press. 1993.

The Discovery Of Superconductivity. Jacobus de Nobel in Physics Today. Vol. 49. No. 9, Pages 40 - 42; September 1996.



الإنيونـات ودورهـا فـي الموصليـة الفائقة عند درجات الحرارة العالية

في نطاق ميكانيك الكم (الميكانيك الكمومي) تخضع الجسيمات اللاممَيَّزة لتفاعلات خاصة. وقد كشف بحث حديث عن وجود صنف جديد خصب من الإمكانيات: الإنيونات.

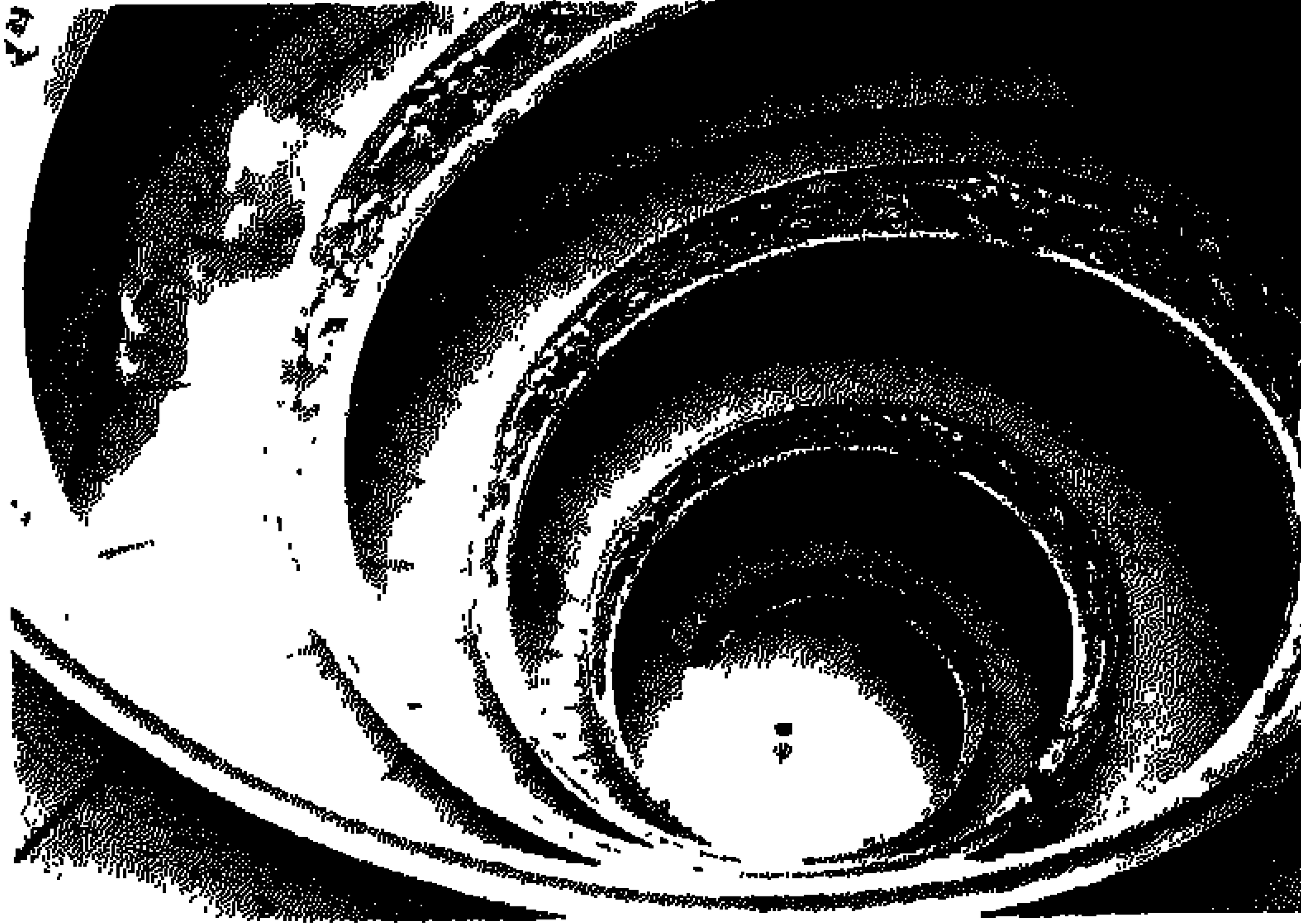
(ف. فلتشك)

من أكثر نتائج ميكانيك الكم إدهاشا وعمقاً وجمالاً أنه يكسب القواعد الحاكمة للجسيمات أو الأشياء المتطابقة تماماً، معنى واضحاً وجديداً. وتخضع الجسيمات غير المميزة (اللامتباينة) indistinguishable حقاً، لتفاعلات خاصة قوية لا وجود لها بين الجسيمات التي هي شديدة التشابه فحسب. وتكون هذه التفاعلات الخاصة تجاذبية شديدة في حالة صنف من هذه الجسيمات يسمى البوزونات bosons وتدافعية شديدة في حالة صنف آخر هو الفرميونات fermions.

والبوزونات والفرميونات معروفة منذ نشأة ميكانيك الكم. وحتى وقت قريب كان الاعتقاد السائد هو أن الفرميونات والبوزونات هما الصنفان الوحيدان الممكنان من الجسيمات المتطابقة. وفي الواقع، فإن ثمة مراجع عديدة في ميكانيك الكم تورد «براهين» على هذا الشيء الذي يشبه الحقيقة factoid.

ولقد أوضح الفحص الدقيق لأسس ميكانيك الكم الخاصة بالجسيمات غير المميزة أنه يوجد عوضاً عن تلك إمكانات أخرى متسقة. وفي الواقع توجد سلسلة مستمرة من الإمكانيات التي تحتوي على الفرميونات والبوزونات كحالتين خاصتين. وفي الحالة العامة يستطيع المرء تسمية هذه الجسيمات باسم «الإنيونات» anyons.

وفي البداية كان الاعتقاد الغالب لدى الفيزيائيين القليلين الذين فكروا أصلاً في الإنيونات هو أنها غرائب رياضياتية. ولكن الفحص الأعمق كشف عن وجود الإنيونات في النماذج النظرية التي تشبه إلى حد بعيد النماذج المستخدمة في وصف المنظومات الحقيقية والمواد. كما أوضحت الدراسات التفصيلية أيضاً العمق والاتساق الداخلي لمفهوم الإنيونات. ومع ذلك كانت مفاجأة مذهلة بالنسبة لي - كأحد القليلين - عندما تم عام 1983 اكتشاف بعض الحقائق الملموسة إلى حد ما. فالإنيونات هي الإثارات الأساسية لحالات عجيبة للمادة، معروفة باسم حالات هول المكمّاة الفركتلية (الكسورية) fractional quantized Hall states [انظر: "The Quantized Hall Effect," by B. I. Halperin; Scientific American, April 1986].



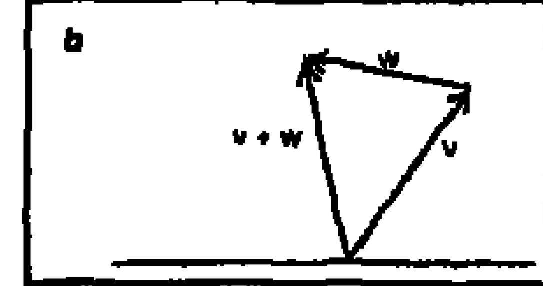
إن بيت الدرج الدائري هو تشبيه مناسب لعدة جوانب من فيزياء الإنيونات. فالفرق الأساسي بين الإنيونات والبوزونات (أو بين الإنيونات والفرميونات) يتلخص في أنه يجب على المرء ألا يميز فقط بين الجسيمات التي تتبادل مواقعها، بل أيضاً بين الجسيمات التي يدور أحدها حول الآخر. يذكرنا بيت الدرج الدائري أيضاً بترتيب التيارات داخل ملف، وبحركة الجسيمات المشحونة في المجالات المغنطيسية - وهي أشكال فيزيائية تؤدي دوراً رئيسياً في نظرية الإنيونات. صمم هذا الدرج الدائري (ب. بونتلي)، وهو جزء من كنيسة سستين بمدينة الفاتيكان في روما.

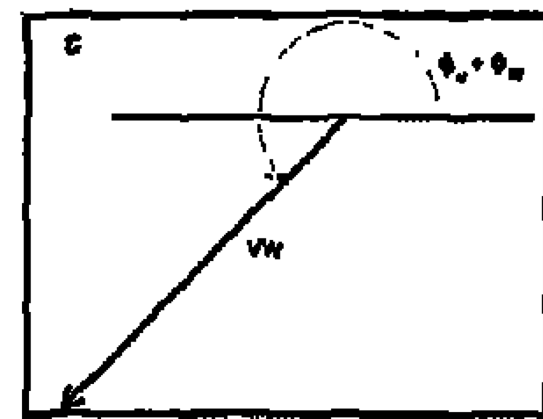
وقد أدى إدراك هذه الحقيقة إلى فهم أكثر عمقاً لعدة جوانب لظاهرة هول المكماة نفسها كما أثار نشاطاً عظيماً في مجتمع الفيزيائيين.

ويعتقد الكثيرون منا أن هذا المثال ـــ المثير للإعجاب بحالته الراهنة ـــ هو مجرد بداية. وتُقدِّم الإنيونات نموذجاً جديداً لسلوك المادة في ميكانيك الكم، وإذا كان الإنصاف موجوداً في العالم فإن هناك حقائق كثيرة تنتظر الاكتشاف. ويثير الاهتمام بشكل خاص وجود آلية mechanism قوية وطبيعية إلى حد بعيد جداً للموصلية الفائقة (الفاموصلية) superconductivity لها علاقة بالإنيونات. وقد أمكن بناء نظرية للموصلية الفائقة عند درجات الحرارة العالية تستغل خاصية الإنيونات هذه. ومن الجائز جداً تطبيقها على الموصلات الفائقة (الفاموصلات) superconductors المصنعة من أكسيد النحاس التي اكتسبت شهرتها حديثاً.

الأعداد المركبة (العقدية)







يمكن تمثيل الأعداد المركبة بإزاحات في مستوٍ، تماماً مثلما يمكن تمثيل الأعداد الحقيقية بإزاحات على طول خط. يمثل السهمان المشار إليهما بالرمزين v وw في الرسم a عددين مركبين.

لكل عدد «مقدار» magnitude وهو طول السهم، و«طور» phase وهو اتجاه السهم. وبناء على هذا التمثيل يمكن بسهولة تصور عمليات جمع الأعداد المركبة وضربها. فلجمع العددين المركبين v وw يجب إزاحة السهمين كما هو موضح في الرسم a.

أما الضرب فهو أكثر تعقيداً كما هو موضح في الرسم c، فمقدار (أو طول) حاصل ضرب v في w هو ببساطة طول v مضروباً في طول w. أما اتجاه، أو طور، حاصل ضرب v في w فيُعرّف بالزاوية التي هي مجموع زاوية الاتجاه الخاصة بالسهم v أي ϕv وزاوية الاتجاه الخاصة بالسهم w أي ϕw.

وسوف أستعرض في هذه المقالة المنطق الذي يقود إلى مفهوم الإنيونات والحالات المعروفة التي تحدث فيها حالياً، وآلية الموصلية الفائقة التي توحي بها.

من المستحيل فهم الإنيونات دون فهم البوزونات والفرميونات. لذا سأقدم الآن تقريراً مختصراً، وإلى حد ما غير تقليدي، عن جوهر البوزونات والفرميونات لن أبدأ بالتوضيح كيف أن سلوك البوزونات يؤدي دوراً رئيسياً في منظومات تبدأ بالسيولة الفائقة superfluidity وتنتهي بعمل الليزر. وكذلك لن أستعرض كيف أن طبيعة الفرميونات لها أهمية رئيسية في فهم الجدول الدوري للعناصر واستقرار النجوم المعروفة باسم الأقزام البيض white dwarfs. وبدلاً من ذلك سوف أركز هنا على الفحص الانتقادي للمفاهيم الأساسية في أبسط الظروف الممكنة لكي أمهد الطريق أمام الإنيونات.

ولنبدأ ببعض التجارب الذهنية thought experiments وهي لا تختلف عن التجارب الحقيقية التي أجريت إلا بأنها تميل قليلاً إلى المثالية. تتعلق التجارب الذهنية بسلوك نوعين من ذرات الهيليوم يرمز لهما بـ ^{3}He و^{4}He. وهذان النوعان يختلفان فقط في طبيعة نواهما. إذ تحوي نواة ^{3}He بروتونين ونترونا واحداً، في حين تحوي ^{4}He بروتونين ونترونين. ولأن كلتا النواتين تحتوي على عدد واحد من البروتونات فلهما الشحنة الكهربية نفسها. وعلى هذا فإن الخواص الكهربية لهاتين النواتين تكون متماثلة تقريباً. ولما كانت القوى الكهربية تعتبر إلى حد بعيد أكثر العوامل أهمية في تحديد تفاعلات النوى مع الإلكترونات المحيطة بها ومن ثم تحديد الخواص الكيميائية للذرات، فإن ذرات ^{3}He و^{4}He لها الخواص الكيميائية نفسها إلى حد ما.

ويستطيع المرء تيقن ذلك بطريقة محددة جداً كما يلي: نفترض أن هناك جسيماً آخر يختلف عن ^{3}He و ^{4}He ولنسمه x. وقد يكون x هذا ذرة حديد مثلاً أو جزيء ماء أو حتى ضفيرة (طاق) جزيء دنا DNA. ولكي نرى ما إذا كان x يتفاعل بالطريقة نفسها مع كل من ^{3}He و^{4}He يمكننا أن نصدمه بهما على التوالي ونقارن النتائج. يعرف هذا النوع من الأبحاث باسم تجارب التبعثر scattering experiments وهو شائع الاستعمال لتعرُّف خواص الجسيمات.

تخيل أولاً إطلاق كل من ذرات ^{3}He والجسيمات x الواحد على الآخر. فما دامت هذه الجسيمات تتحرك بسرعات ليست كبيرة جداً، فإنها سوف تبقى سليمة بعد التصادم وتنحرف بزاوية ما. وبعد رصد العديد من التصادمات يمكن حساب احتمال أن تصدر جسيمات عن تصادم ما بزوايا مختلفة (أي بعد أن تعاني مقادير مختلفة من الانحراف). ويرمِّز توزيع الاحتمالات هذا كميةً كبيرة من المعلومات حول طبيعة التفاعل بين الذرات.

بعد إجراء تجربة التبعثر مع ^{3}He (في مخيلتنا طبعاً) لنحاول إجراء التجربة نفسها مع ^{4}He . سوف نجد أن هناك اختلافاً طفيفاً في النتائج بين التصادم مع ^{3}He والتصادم مع ^{4}He بغض النظر عن نوع x، وأن احتمال الانحراف بزاوية معينة واحد في الحالتين. هذه النتائج هي ما يمكن أن نتوقعه بالضبط، لأن أهم القوى هنا هي القوى الكهربية، والخواص الكهربية لذرات ^{3}He و^{4}He. ويوجد طبعاً ثلاث حالات محتملة: قد تتصادم ^{3}He مع ^{3}He أو ^{3}He مع ^{4}He أو ^{4}He مع ^{4}He. وعلى أساس التجربة السابقة قد يتوقع المرء نتيجة واحدة في الحالات الثلاث المذكورة. ولكن ما يحدث في الواقع هو شيء مختلف تماماً.

إن أبسط النتائج وأكثرها إدهاشاً هو ما يحدث للجسيمات التي تنحرف بزاوية 90 درجة. ولمشاهدة هذه النتائج نتأمل ترتيباً مكوناً من جهازين لإطلاق الجسيمات (مدفعين) ومن كاشفين وضعت كلها فوق منضدة.

ولنفترض أن كل مدفع يطلق ^{3}He أو ^{4}He، وأن أحد المدفعين يطلق الجسيمات في اتجاه الشرق والآخر يطلقها في اتجاه الغرب ليلتقيا في نقطة مركزية. أما الكاشفان فهما مثبتان في موقعين باتجاه الجنوب والشمال بالنسبة لمنطقة التصادم، لكي يستطيعا الإمساك بالجسيمات التي تنحرف بزاوية 90 درجة. فما هي النتائج؟

سيكتشف المرء أن احتمال التبعثر بزاوية 90 درجة في حالة تصادم جسيمين من ^{4}He هو بالضبط ضعف الاحتمال في حال التصادم بين ^{3}He و^{4}He، في حين يتلاشى احتمال التبعثر لجسيمين من ^{3}He خلال الزاوية نفسها نتيجة لتصادمهما. ويتعذر على المرء أن يبحث عن برهان أكثر إثارة يبين أن ثمة شيئاً خاصاً تتميز به الفيزياء الكمومية للجسيمات المتطابقة.

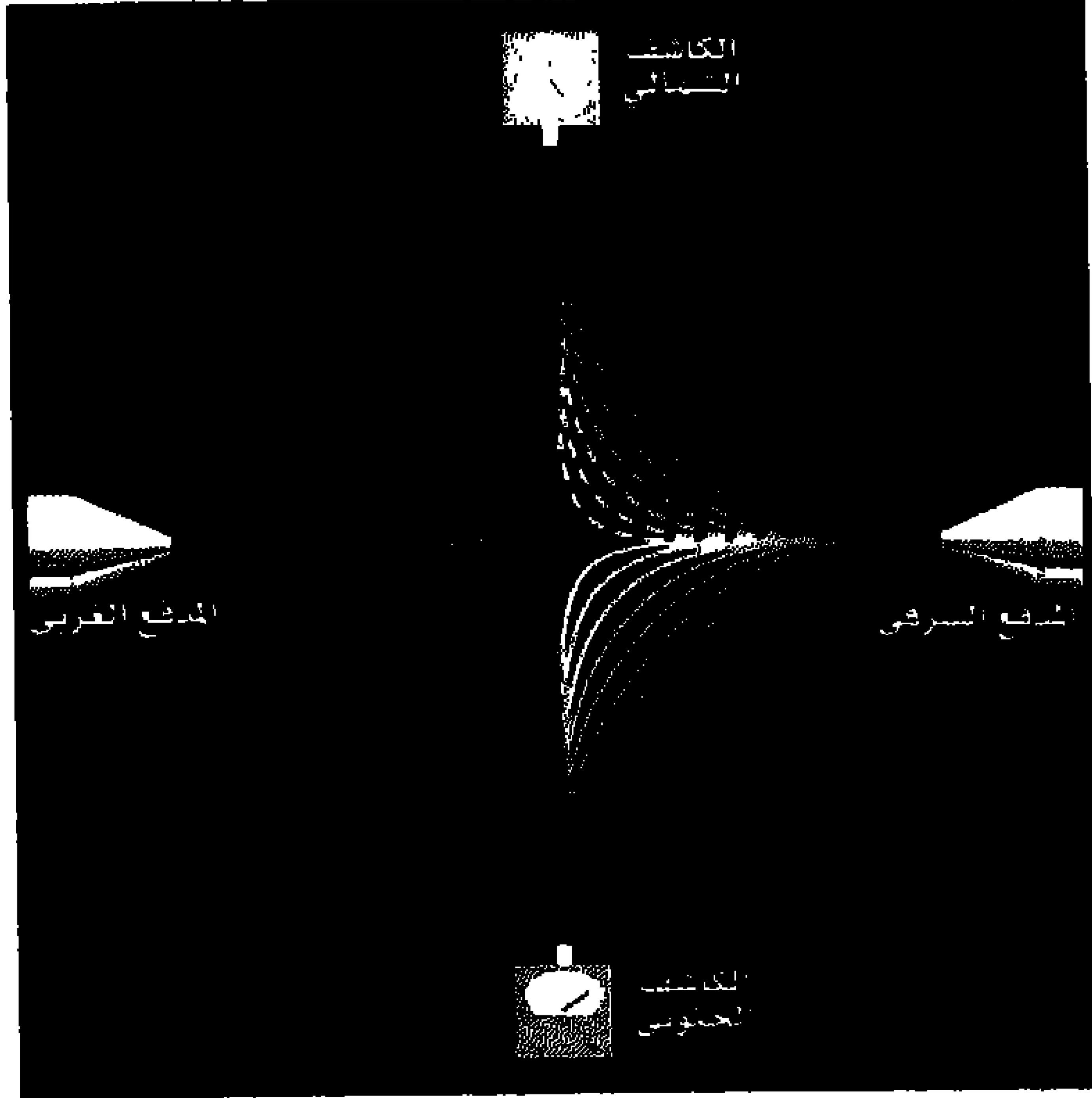
تعتبر ذرات ^4He مثالاً للبوزونات في حين تعتبر ذرات ^3He مثالاً للفرميونات. ولفهم سلوك هذه الجسيمات فهماً صحيحاً لابد من العودة إلى المبادئ الأساسية لميكانيك الكم.

تتركز المقومات الأساسية، التي تستخدم في وصف عمليات ميكانيك الكم، في أعداد مركبة (عقدية) تعرف باسم السعات (جمع سعة amplitude). (يستطيع القراء، الذين لم يطلعوا بعد اطلاعاً حسناً على الأعداد المركبة (العقدية) أن يجدوا عرضاً ملخصاً – أرجو ألا يكون مصدر عناء– في الإطار المبين في هذه الصفحة). وكجميع الأعداد المركبة فإن للسعة مقداراً magnitud وطوراً phase. ولحساب احتمال حدوث أي عملية يجب أن نربع مقدار سعتها.

ونستطيع الآن أن نورد المبدأ الأساسي أكثر من سواه في ميكانيك الكم وهو مبدأ التراكب superposition: فلحساب السعة الكلية لعملية إجمالية ربما تكون قد حدثت بطرق مختلفة، يجب أن نجمع سعات الطرق المختلفة. وعادة، يكون احتمال الحصول على نتيجة إجمالية ما مساوياً مجموع احتمالات التوصل إليها بالطرق المختلفة (فمثلاً احتمال أن يكون زهر النرد 5 أو 6 هو مجموع احتمال أن يكون 5 واحتمال أن يكون 6 منفصلين). وفي ميكانيك الكم فإننا بدلاً من ذلك نجمع السعات. وعموماً ليس هنا مكان الحديث بتوسع عن مبدأ التراكب. وفيما يخص أهدافنا الحالية سنكتفي بافتراض وجوده والنظر في نتائجه.

لنعاود الآن فحص تجربتنا الذهنية باستخدام مفهوم السعات. نفترض أولاً تصادمات بين ذرات ^4He آتية من الغرب مع ذرات ^3He آتية من الشرق. فلحساب السعة الكلية للحالة التي ينتقل فيها الجسيم ^4He من المدفع إلى الكاشف الشمالي، يجب جمع كل السعات العائدة للمسارات المختلفة التي تؤدي إلى النتيجة النهائية وهي تصادم ذرة ^4He مع الكاشف الشمالي. عندئذ يكون الاحتمال هو مربع هذه السعة الكلية. ويمكن تطبيق هذه السلسلة من الحسابات على حالة ^3He. ونتيجة لتماثل (لتناظر) الوضع، ولأن القوى المهمة واحدة في الحالتين، فإن احتمال وصول ^4He يكون مساوياً احتمال وصول ^3He. وعلى هذا فإن احتمال وصول شيء ما إلى الكاشف الشمالي هو بالضبط ضعف احتمال وصول ^3He أو ^4He.

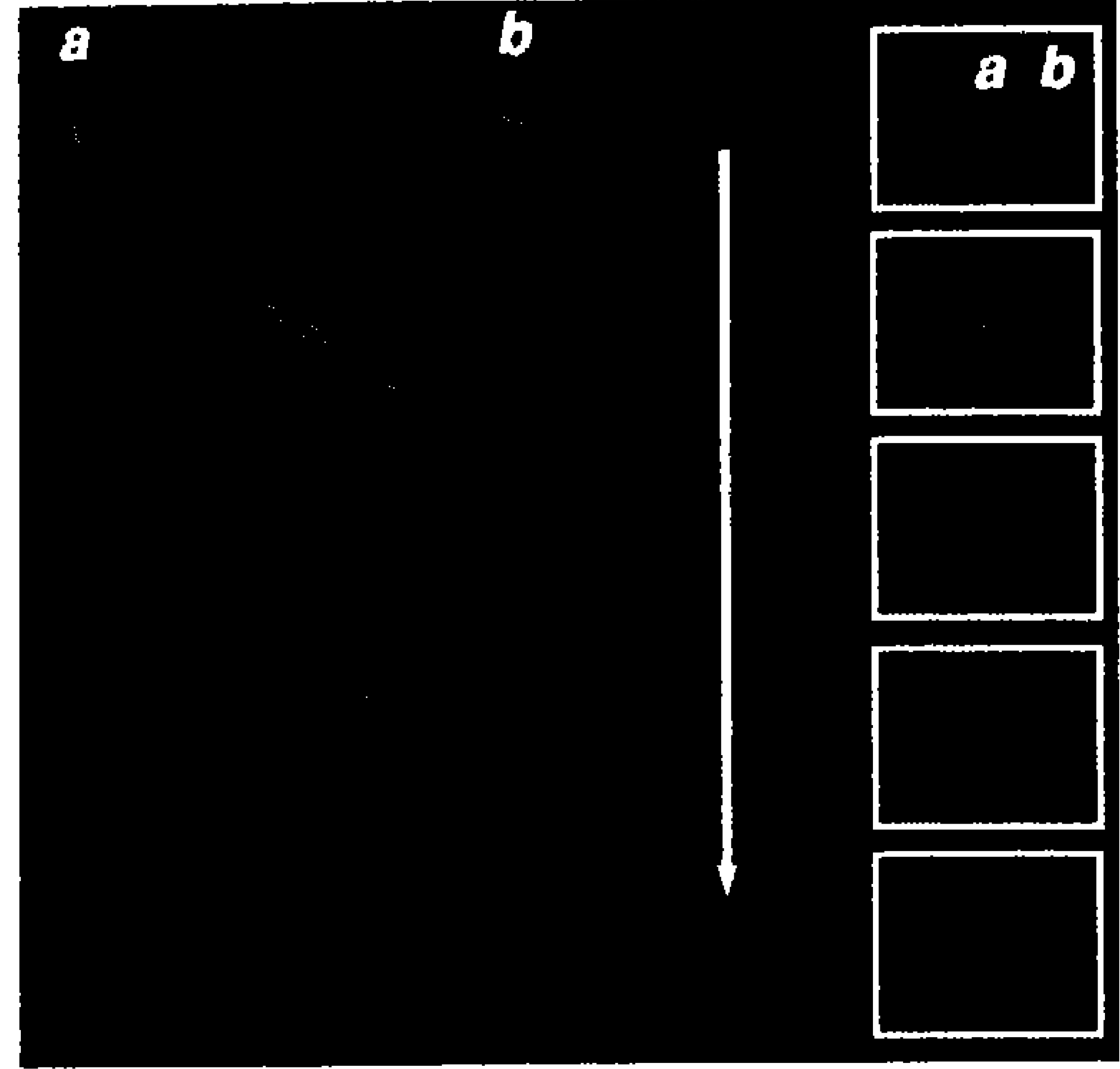
لننظر الآن في التصادمات بين ذرات غربية وشرقية كلها ^4He عائدنا الآن سعتان لعمليتين: تنحرف الذرة الشرقية إلى الأعلى باتجاه الكاشف الشمالي، وكذلك ينحرف الجسيم الغربي إلى الأعلى باتجاه الكاشف الشمالي. وتؤدي كلتا العمليتين إلى نتيجة واحدة هي تحديداً: «ذرات ^4He تصطدم بالكاشف الشمالي». وهكذا فإن مبدأ التراكب يدخل مجال التطبيق هنا، إذ يرشدنا إلى جمع السعات لكل طرق التوصل إلى نتيجة معينة. وكونه يتعين علينا عند هذه النقطة جمع السعات، لا الاحتمالات، يمثل الفرق الحاسم بين العمليات التي تشترك فيها جسيمات غير مميزة وأخرى تشترك فيها جسيمات مميزة.



تستطيع تجربة الاستطارة (التبعثر) أن توضح سلوك الجسيمات من وجهة نظر ميكانيك الكم. فهناك مدفعان يطلقان الجسيمات أحدهما باتجاه الآخر، وهناك كاشفان يقومان بتسجيل الجسيمات التي تنحرف بزاوية مقدارها 90 درجة. تمثل الخطوط المتصلة مجموعة من المسارات المحتملة بالنسبة للجسيمات المنحرفة، وتمثل الخطوط المتقطعة مجموعة أخرى. إن احتمال اتباع الجسيمات للمسارات القريبة من المركز (الألوان الفاتحة) أكبر من احتمال اتباعها للمسارات الأخرى البعيدة عنه (الألوان القاتمة).

وعلى أساس تناظر الوضع فإن سعات الوصول إلى الشمال، سواء كان القدوم من الشرق أو الغرب، تكون متساوية. وتبعاً لمبدأ الانضمام أو التراكب يجب جمع السعات لنحصل على السعة الكلية لعملية التصادم، التي ستكون ضعف سعة أي من مجموعتي المسارات. ومن ثم فإن احتمال أن يصدم الجسيم ^4He الكاشف يساوي مربع مقدار السعة الكلية، أي إنه أربعة أمثال احتمال أي من مجموعتي المسارات. هذه النتيجة هي ضعف ما وجدناه للمعدل الكلي لما يصل إلى الكاشف الشمالي في حالة التصادم بين ذرات ^3He وذرات ^4He وهو ما يتفق مع النتائج التجريبية.

ولكن ماذا عن أكثر النتائج إدهاشاً، وهي أن الاحتمال يتلاشى عند زاوية 90 درجة في حالة تصادم ^3He مع ^3He؟ وكيف يمكن تجاوز البرهان الوارد في الفقرة السابقة الذي أدى إلى زيادة الاحتمال (بدلاً من انعدامه) في حالة الجسيمات غير المتباينة؟ إن قاعدة جمع السعات الشرقية والغربية يجب أن تعدل. والتعديل المطلوب بسيط، ولكن قد يبدو للوهلة الأولى عجيباً ومصمماً وفق مقتضى الحال. والقاعدة المعدلة هي أنه في حالة الفرميونات، التي يعتبر ^3He مثالاً عليها، يجب طرح السعات العائدة للمسارات عندما تنحرف الجسيمات بالتصادم. ولما كانت سعات الوصول إلى الشمال بعد الانطلاق departure من الشرق والغرب متساوية فإن هذه القاعدة تؤدي – فيما يتعلق بالوصول إلى الشمال – إلى سعة كلية معدومة، ومن ثم إلى احتمال معدوم.



تتبادل الجسيمات اللامميزة مواضعها مرة بعد أخرى خلال رحلتها في الزمان والمكان. والنتيجة النهائية لذلك هي عملية خالية من التبادل. وبالنظر من الجسيم a باتجاه الجسيم b يتضح أن المواقع النسبية ترسم منحنياً مغلقاً في الفضاء. (الرسوم من 1 إلى 5).

من حيث الأساس، هذا هو كل ما هناك في إطار الإحصاء الكمومي التقليدي للبوزونات والفرميونات. وكل شيء بعد ذلك يمكن أن ينتج من هذه القواعد الأساسية ولتلخيص ما سبق: هناك صنفان ممكنان من الجسيمات المتطابقة هما البوزونات والفرميونات. ففي حالة البوزونات (مثل ^4He) يجب، ببساطة، جمع كل السعات العائدة للطرق المؤدية إلى النتيجة النهائية؛ أما في حالة الفرميونات (مثل ^3He) فيجب طرح السعات عندما تنحرف الجسيمات بالتصادم.

إن القاعدة التي تنص على وجوب طرح سعات الفرميونات مذهلة وتتطلب تفسيراً أعمق. لنحاول تدعيم فهمنا عن طريق البحث عن «قاعدة القواعد». هل ثمة إمكانيات لوجود قواعد أخرى بجانب تلك القواعد التي تطبق على البوزونات والفرميونات؟ ما المتطلبات العامة التي يجب أن تحققها عملية جمع سعات الجسيمات المتطابقة؟

يأتي الشرط الأساسي أكثر من سواه من مبدأ في ميكانيك الكم وثيق الصلة بمبدأ التراكب. ففي حساب الاحتمال العادي، ثمة قاعدة تقول إن احتمال تتابع حدثين يساوي احتمال حدوث الأول مضروباً في احتمال حدوث الآخر (فيما إذا حدث الأول). فمثلاً احتمال أن أصيب كرة سريعة[1] بحيث أسجل «إصابة الدورة الكاملة»[2] هو جداء احتمال رمي كرة سريعة في احتمال أن أسجل «إصابة الدورة الكاملة» إذا رميت كرة سريعة. وقد ذكرنا في مناقشتنا السابقة المتعلقة بمبدأ التراكب، أن القواعد المعتادة الخاصة بجمع الاحتمالات، تستبدل بها في ميكانيك الكم قواعد جمع السعات. وعلى هذا يجب ألا يثير دهشتنا كلياً أن قاعدة ضرب احتمالات أحداث متتالية تستبدل بها في ميكانيك الكم قاعدة تنص على أن حساب السعة الكلية لأحداث متتالية يُحتّم ضرب السعات الجزئية لكل خطوة على التوالي.

هذه قاعدة في غاية القوة؛ فهي تسمح بتقييم سعة عملية لها ماض معقد بدلالة عمليات أبسط منها بكثير. في البداية يجب تقسيم العملية إلى أحداث عديدة حدثت في مجالات زمنية قصيرة. بعد ذلك يجب تحديد السعة لكل حدث أكثر قصراً. وفي النهاية يجب إيجاد حاصل ضرب السعات لكل هذه الأحداث الأقصر للحصول على السعة الخاصة بكامل العملية. إن جزءاً من قوة هذه النظرة الثاقبة يأتي من أنه في حالة الأزمنة القصيرة جداً يكون سلوك الجسيمات محكوماً أساساً بالميكانيك التقليدي (الكلاسيكي). وعلى هذا الأساس، فبتقسيم هذه المسارات ثم تجميعها مجدداً فإنه من الممكن تحديد قاعدة ميكانيك الكم للسعات بشكل وحيد تقريباً من القوى التقليدية (الكلاسيكية) وتفاعلاتها.

بيد أن بعض العمليات لا يمكن أن تقسم إلى تغيرات صغيرة متتابعة. في هذه الحالات لا يمكن استعمال قاعدة ضرب السعات ومن ثم فلا يمكن الحصول على أي إرشادات من الميكانيك التقليدي. مثال تلك العمليات يحدد في تجربة تبعثر الهيليوم في حالة الذرات غير المميزة. في تلك التجربة تنقسم المسارات التي تؤدي إلى الوصول إلى الشمال إلى قسمين يأتي أحدهما من الشرق والأخر من الغرب. وفي نطاق كل من هذين القسمين ترتبط جميع المسارات بتغيرات صغيرة. ولكن بين القسمين الشرقي والغربي ترتبط المسارات بتغير كبير، لأن هوية الجسيم الواصل مختلفة تماماً. وعلى ذلك لا يمكن تعيين السعة النسبية لهذه المسارات من سعات المسارات الصغيرة جداً. وعلى الأخص فإنها لا تتعين «بسلوك» الجسيمات عند الحد التقليدي.

ودون الاسترشاد بوساطة الحد التقليدي قد يبدو أننا نواجه ثراء مربكاً؛ إذ إن أي سعة من السعات قد تبدو ممكنة. ولكن لحسن الحظ فإن على هذه الإمكانات قيوداً قوية، لأن سعات المسارات المتميزة طوبوغرافياً (أي المسارات التي لا يمكن أن تتحول باستمرار من أحدها إلى الأخر) يجب أن تخضع للمبادئ العامة لميكانيك الكم. وعلى الأخص فإن السعات يجب أن تتماشى مع المبدأ القائل بأن سعات الأحداث المتتالية تساوي حاصل ضرب سعات الأحداث الجزئية المتتابعة.

ولكي نرى قوة هذا الشريط الأساسي، لنحاول تطبيقه على عمليتي تحويل swithing متتاليتين. فإذا تبادل جسيمان موضعيهما ثم تبادلا الموضعين مرة أخرى، فمن الواضح أن الأثر النهائي لذلك

(1) fastball رمية لكرة البيسبول بسرعة كبيرة.

(2) home run إصابة في لعبة البيسبول تتيح للرامي القيام بدورة كاملة على القواعد مع تسجيل نقطة. (التحرير)

أنه لا يوجد تبادل على الإطلاق. وعلى ذلك، وبغية الاتساق، فإنه عند الضرب في معامل تحويلي ما، ثم الضرب في هذا المعامل مرة أخرى، فإن النتيجة الكلية يجب أن تكون كما لو ضربنا في الواحد الصحيح. وبعبارة أخرى، فإن مربع معامل التحويل لابد أن يكون مساوياً للواحد الصحيح. وهكذا لا يكون أمامنا من الناحية الرياضياتية سوى إمكانيتين فحسب: المعامل نفسه يجب أن يساوي (1) أو (-1). وبناء على ذلك يجب أن نجمع السعات أو نطرحها عند انحراف الجسيمات بالتصادم. وهاتان هما حالتا البوزونات والفرميونات بالضبط، وكلتا الحالتين يمكن ملاحظتهما في الطبيعة كما رأينا.

ولكن هل هذه هي نهاية القصة؟ إذا كان صحيحاً أنه لا يوجد غير هاتين المجموعتين المنفصلتين من المسارات المقابلتين لجسيمات تتبادل هويتها، فهذه هي النهاية. ولكن ليس واضحاً تماماً ما إذا وجدت فوارق أخرى منقطعة المسارات.

لنتأمل مثلاً المسارات التي يدور كل منها حول الآخر عدة مرات مختلفة [انظر الشكل في هذه الصفحة]. ولأن عدد الدورات يجب أن يكون دائماً عدداً صحيحاً، فإن أي تغيير يجب أن يكون صحيحاً أي بقفزات منفصلة. وهذا يعني أن التغيرات المستمرة في المسار - التي لا تؤدي إلى قفزات - لا تستطيع تغيير عدد الدورات على الإطلاق. فهل تُغيِّر إمكانية الدوران تصنيف المسارات وتؤدي إلى إمكانيات جديدة للإحصاء الكمومي؟

الإجابة في الفضاء الثلاثي الأبعاد هي لا. وأفضل طريقة لرؤية ذلك هي النظر من نقطة الأفضلية (موقع أحد الجسيمات) إلى جسيم آخر. فأثناء الحركة يرسم الوضع النسبي للجسيم الآخر منحنياً في الفضاء، ويمكننا تصور انكماش هذا المنحني حتى يصبح نقطة واحدة بحيث لا يمر المنحني إطلاقاً بنقطة الأفضلية. وبطريقة شبيهة بذلك يمكن عدم إنجاز أي دوران ظاهري مهما كان معقداً، وهكذا يظل المسار الأصلي المعقد مرتبطاً دائماً بمسار بسيط جداً.

وفي الفضاء ذي البعدين يختلف الوضع تماماً عن ذلك. فمسار الجسيم يستطيع أن يكون مثل الأنشوطة lasso حول نقطة الأفضلية. فإذا فعل ذلك فإنه لا يمكن أن ينكمش دون المرور بها. ومن ثم فإن المسار لا يمكن أن ينسب إلى مسار بسيط جداً إلا عن طريق تغير غير مستمر، أي من خلال قفزة فوق الجسيم الذي يمثل نقطة الأفضلية. وفي الواقع فإن المسار يستطيع الالتفاف حول نقطة الأفضلية عدة مرات، إما في اتجاه حركة عقارب الساعة أو في الاتجاه المضاد. والمسارات التي لها أعداد نهائية باستمرار بعضها إلى بعض.

بعد أن تسلحنا بهذه النظرية الثاقبة، لنكرر فحص الحجة التي أدت إلى استنتاج أن البوزونات والفرميونات هي الأشكال المتسقة الوحيدة لقواعد التفاعل بين الجسيمات المتطابقة. لقد استندت هذه الحجة إلى حقيقة أنه إذا اتبعنا تبادل الهوية بتبادل آخر مماثل، فإن النتيجة يمكن أن تشوه باستمرار إلى مسارات منحلة وعادية (غير متشابكة وبسيطة جداً). ومع ذلك ففي الفضاء ذي البعدين، يستحيل على المسارات التي لا تتضمن تبادلاً في الهوية، أن تصير غير متشابكة تماماً. وعلى سبيل المثال لا يمكن أن يكون المسار الذي دار فيه جسيم حول آخر غير متشابك في الفضاء ذي البعدين. فإذا كان هناك دوران يجب أن نكون أكثر حرصاً في صياغة «قاعدة القواعد».

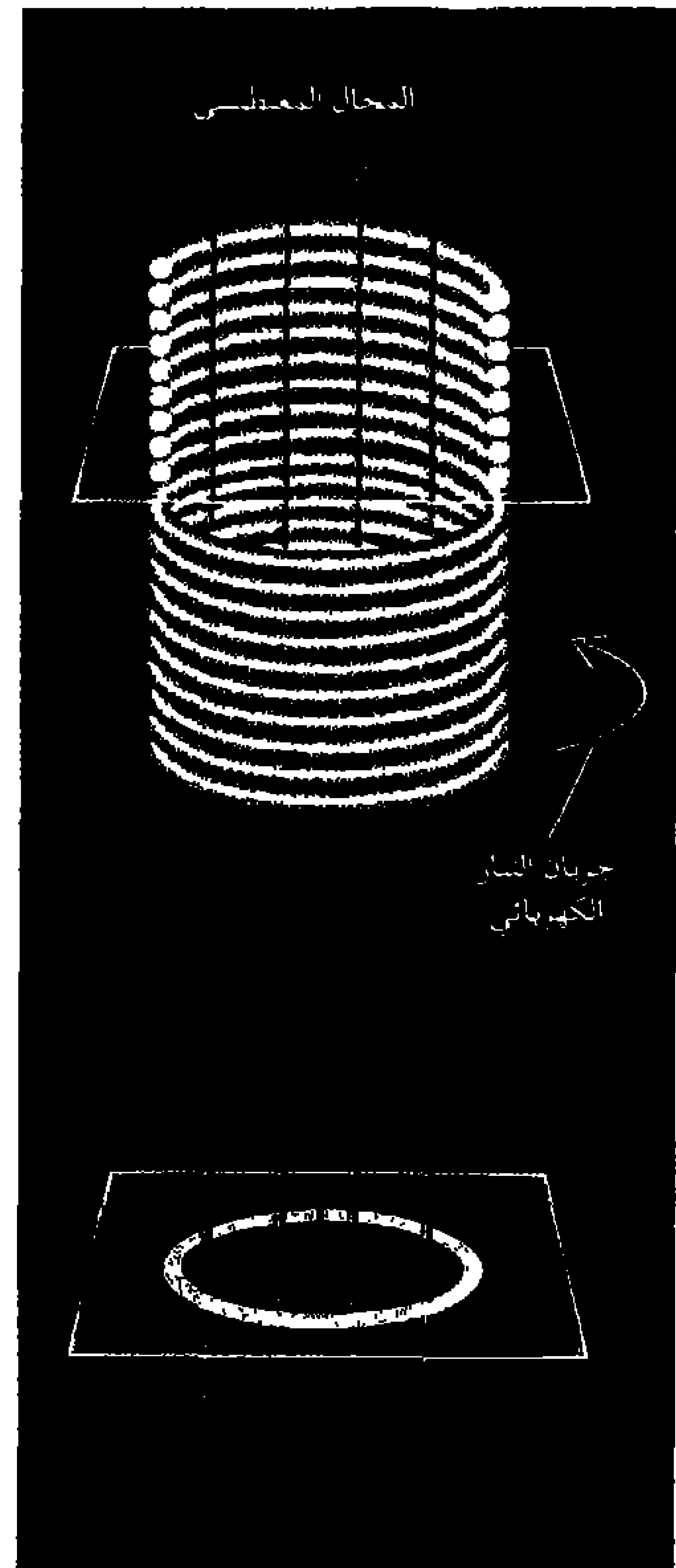
ما العلاقة بين التبادل والدوران؟ بمعنى من المعاني يمكن اعتبار التبادل نصف دورة. لتوضيح ذلك نتأمل طريقة محددة لعمل التبادل، فنفترض أن هناك جسمين يدوران في اتجاه عقارب الساعة حول نقطة المنتصف بينهما حتى يصل كل منهما إلى الموضع الأصلي للآخر، مما ينتج منه تبادل الهوية. فإذا فعلنا ذلك مرة أخرى فإن الجسمين يعودان إلى نقطة البداية بعد دوران كل منهما حول الآخر دورة كاملة مرة واحدة. هذا يعني أن تبادلين متتابعين ينتج منهما مسار لدورة واحدة كاملة، هذا المسار لا يمكن تشويهه إلى مسار عادي غير متشابك — على الأقل في الفضاء ذي البعدين. وعلى ذلك فالشرط الأساسي الذي يتطلب ببساطة أن يكون مربع معامل التبادل مساوياً للواحد يصير بعد ذلك غير صحيح. وفي الحقيقة قد يكون هذا المعامل أي عدد مركب. وللتسهيل سوف أفترض أن β هو عدد مركب يضرب في سعة التبادل في اتجاه حركة عقارب الساعة. وعلى ذلك فإن السعة المقابلة لدورة كاملة في اتجاه عقارب الساعة سوف تكون β^2، وسعة دورتين هي β^4 وهكذا. لا يوجد هنا شرط أن تكون β تساوي 1 (كما في حالة البوزونات) أو (-1) (كما في حالة الفرميونات). إن البوزونات والفرميونات هي مجرد حالتين حديتين. ويوجد سلسلة متصلة للإمكانات الواقعة بينهما. والمصطلح «إنيونات» يعبر عن حرية اختيار أي عدد مركب.

كيف يعالج ميكانيك الكم عملية تتضمن أكثر من زوج من الإنيونات؟ إن القواعد المتعلقة بسعات عمليات تنطوي على جسيمات كثيرة متطابقة، يمكن اشتقاقها من تلك القواعد المتعلقة بجسيمين فقط. ففي حالة البوزونات يجب جمع السعات ببساطة. وفي حالة الفرميونات يجب حساب العدد الكلي لتبادلات الهوية ثم الضرب في (-1) للمسارات التي لها عدد فردي من التبادلات، وفي النهاية نقوم بجمع السعات. وفي الحالة العامة للإنيونات يجب جمع العدد الكلي للدورانات لكل الأزواج ثم ضربها بعد ذلك في β مرفوعاً للأس المناسب، ثم نقوم بعد ذلك بجمع السعات مرة أخرى.

ويمكن تلخيص النتائج الخاصة بإعادة فحصنا لأسس ميكانيك الكم للجسيمات المتطابقة كما يلي — في الفضاء ذي الثلاثة أبعاد توصلنا إلى فهم عميق لسبب كون البوزونات والفرميونات هي الإمكانيات الوحيدة. أما في الفضاء ذي البعدين فإنها ليست الوحيدة بل يوجد بين البوزونات والفرميونات سلسلة متصلة من الإمكانيات — إنيونات.

بعد تلك الرحلة الفكرية الشاقة، فإن ما توصلنا إليه قد يظهر كما لو أنه مثير للإحباط. فالعالم الحقيقي، بالرغم من كل شيء، هو عالم له ثلاثة أبعاد. أما وجود إمكانيات غريبة لجسيمات متطابقة على أرض مستوية Flatand فقد يبدو أكاديمياً بعض الشيء. ومع ذلك فالإنيونات وثيقة الصلة جداً بالعالم الحقيقي. وفي الواقع هي وثيقة الصلة بوصف بعض أكثر حالات المادة إثارة للاهتمام. كيف يكون ذلك؟ النقطة الأساسية هي أن سلوك المادة في ظروف معينة يبدو كما لو كانت في بعدين اثنين فقط.

أحد هذه الظروف هو عندما نصف طبقات سطحية سمكها ذرة واحدة أو عدة ذرات. وينشأ ظرف آخر في مواد مثل الغرافيت أو الموصلات الفائقة عند درجات الحرارة العالية المصنعة من أكسيد النحاس. هذه المواد مكونة من مستويات من الذرات تكدس بعضها فوق بعض. وثمة حالة أخرى تتصل بمفعول هول المكمى quanrized Hakk effect وهي تنشأ عند حصر الإلكترونات في مستو بوساطة مجالات كهربية. وفي جميع هذه الحالات تكون حالات الحركة في الاتجاه المعامد للمستوي مكماة quantized، وهذا يعني أنها تحتاج إلى كمية محددة من الطاقة لإثارتها. وعند درجات الحرارة المنخفضة إلى حد كاف تكون الطاقة المطلوبة للإثارة غير المتوافرة ومن ثم فإن الوصف في بعدين يصبح مناسباً تماماً.



يولد الملف مجالاً مغنطيسياً ثابتاً في داخل الملف ولا يولد مجالاً خارجه. ويعطي مقطع عرضاني للملف منطقة ذات بعدين تحتوي على مقدار محدد من المجال المغنطيسي أو، بمعنى أدق، من الفيض.

وبالطبع فإن الجسيمات الأساسية مثل الإلكترونات أو الفوتونات تستطيع في النهاية الهروب من أي «أرض مستوية» وعند المستوى، الأساسي أكثر من سواه، (أي عند الطاقات العالية أو في الخلاء) يجب أن تكون بالتأكيد إما بوزونات أو فرميونات. ولكن الوصف المباشر والمناسب بدرجة قصوى لسلوك مادة ما عند الطاقات المنخفضة لا يكون في الحالة العامة بدلالة الجسيمات الأولية. فمثلا يؤثر الإلكترون داخل المادة بقوى في المكونات الأخرى للمادة، ويولد بؤرة صغيرة من الاضطرابات في جواره، تماماً مثل نجمة سينمائية تتحرك وسط جمهور المعجبين بها. والإثارات الأساسية، داخل مادة ما، قد لا تشبه البتة في سلوكها الإلكترونات أو الجسيمات الأولية الأخرى في الخلاء. لهذا السبب فهي تعرف «بأشباه الجسيمات» quasiparticles. والأمل معقود أن تكون أشباه الجسيمات، في المواد ذات البعدين من الناحية الفعلية، هي إنيونات أحياناً.

ولكي تنشأ الإنيونات لا بد أن تحقق هذه المواد شرطاً آخر بعيد الغور ولكنه مهم. إن تعريف الإنيونات يحتوي على المعامل β المرتبط بالدوران في اتجاه عقارب الساعة. ومن أجل الاتساق (التناسق) يجب ربط المعامل β^{-1} بالدوران في الاتجاه المعاكس. ولكن الدوران في اتجاه عقارب الساعة والدوران في الاتجاه المضاد يرتبطان بالانعكاس في المرآة. فالدوران في اتجاه عكس عقارب الساعة يكافيء الدوران في اتجاه عقارب الساعة إذا نظرت إليه في مرآة، وهي علاقة تعرف فنياً باسم تحويل الندية parity transformation . وبالمثل، إذا عكسنا الدوران في اتجاه عكس عقارب الساعة زمنياً فإنه يبدو دوراناً في اتجاه عقارب الساعة. وفيما يخص معظم الأغراض العملية، لا يختلف شكل قوانين الفيزياء الأساسية نتيجة انعكاس الندية أو الزمن. فالعالم الذي نراه ملعكساً في مرآة، أو عندما تستعرض فيلماً سينمائياً — يجري بالعكس زمنياً — يخضع للقوانين الأساسية نفسها في الفيزياء (بتقريب جيد) مثل العالم الحقيقي.

فإذا افترضنا أن التناظر symmetry في ظروف تحويلات الندية وانعكاس الزمن مصون في المادة، فإننا يجب أن نصل إلى نتيجة أن أشباه الجسيمات التي يدور بعضها حول بعض في اتجاه عقارب الساعة والجسيمات التي تدور في الاتجاه المعاكس يجب أن يكون لهما سعة واحدة، ومن ثم فإن β يجب أن يساوي β^{-1} . وهذا يفرض على B القيمة 1 أو 1- لنعود مرة أخرى إلى البوزونات والفرميونات.

ولحسن الحظ فإن هذا المطلب أقل تقييداً مما يبدو. فمع أن معظم القوانين الأساسية في الفيزياء لا تتغير بتحويلات الندية وانعكاس الزمن، فإن هناك حالات محددة ومواد معينة لا موجب لعدم تغيرها. فمثلاً وجود المجال المغنطيسي أو الدوران يخل بكلا هذين التناظرين.

ومن ثم فإن أوضح العقبات أمام وجود الإنيونات في الواقع، يمكن تخطيها. غير أن التفكير في هذه العقبة يؤدي إلى تركيز البحث: الإنيونات يجب أن تكون أشباه جسيمات في المواد التي هي بالفعل ذات بعدين وتخل بتناظري الندية وانعكاس الزمن.

ولكن كيف يمكن تعرف الإنيون إذا رأيناه؟ فالجسيمات أو أشباه الجسيمات لا تظهر، وعليها لافتة مناسبة تفيد بأنها «بوزونات» أو «فرميونات» أو «أي شيء جديد مثل الإنيونات هنا». ولكي نستطيع تعرف الإنيونات يجب أن نعرف كيف يكون سلوكها.

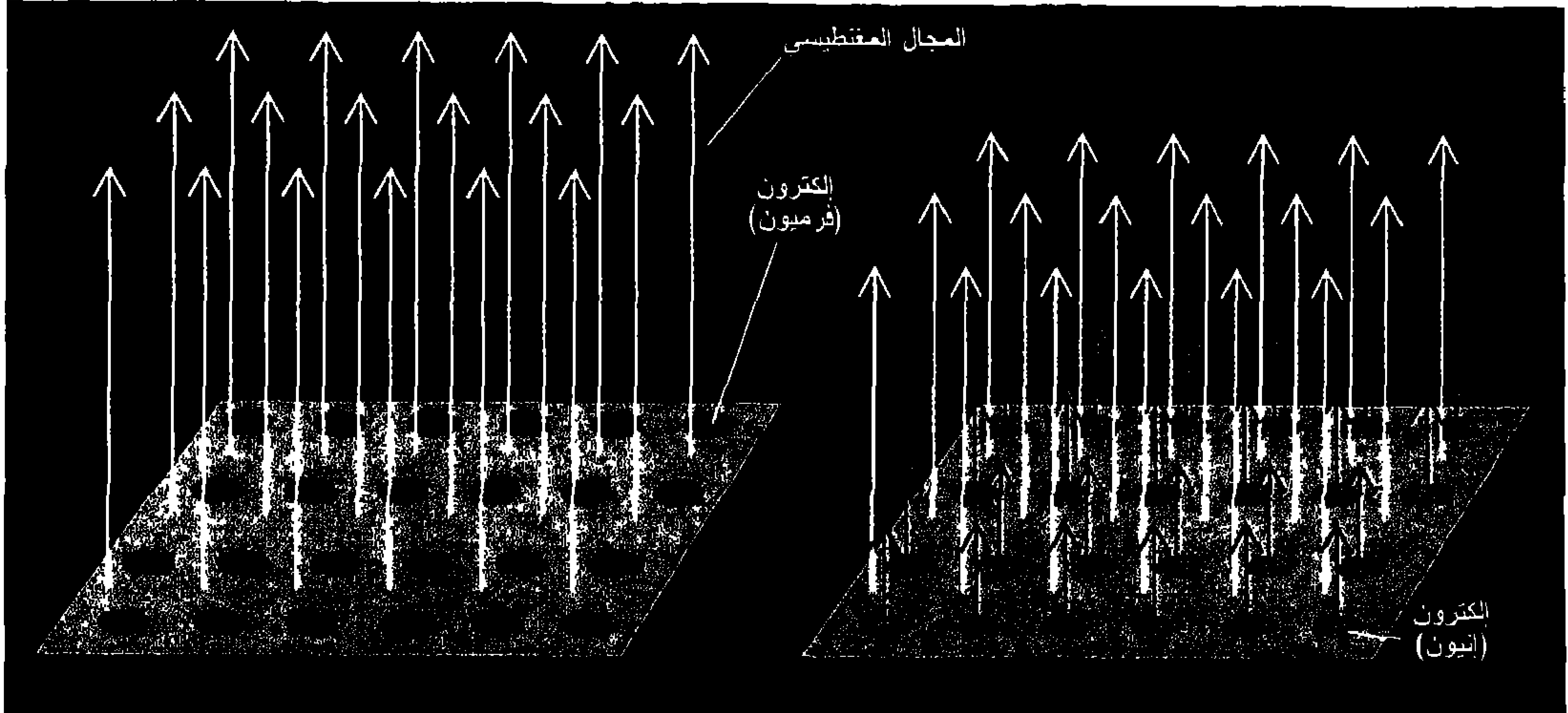
ولمحاولة فهم فكرة جديدة وأصيلة مثل الإنيونات، لا بد من ربطها بأشياء مألوفة كثيراً، وتكون هذه خطة فكرية جيدة. ولحسن الحظ توجد طريقة فعالة جداً لربط الإنيونات العامة بالبوزونات والفرميونات، وهما حالتان مألوفتان بدرجة أعلى. فالسحر الخاص المتاح في بعدين يسمح لنا بقلب صورة metamorphuze الإنيونات إلى بوزونات أو فرميونات – أو العكس – بمعالجات تخيلية لمجالات مغلطيسية وهمية. هذه السيمياء alchemy تسمى التقليب الإحصائي statistical transmutation ، وهو بالغ الأهمية في فيزياء الإنيون من حيث النظرية والتطبيق.

وفيما يلي كيفية عمل التحول الإحصائي ربما يكون عمل الملف الطويل مألوفاً لديك. وهو ليس أكثر ولا أقل من سلك طويل ملفوف (انظر الشكل في الصفحة المقابلة). فعندما يسري التيار في الملف ينشأ مجال مغنطيسي ثابت (يتناسب مع شدة التيار) داخل الملف ولا يظهر أي مجال خارجه. ولتوليد نسخة من الملف ذي البعدين يجب ببساطة أخذ مقطع مستو لهذا الترتيب عمودياً على محور الملف. بهذه الطريقة نجد أن المجال المغنطيسي يكون في بعدين محصوراً تماماً في منطقة صغيرة. تسمى هذه التركيبة نقطة التدفق (الفيض) flux point، ويمكن توليدها تحت ظروف للقدرة الكلية لتوزيع المجال المغنطيسي وهو يساوي حاصل ضرب شدة المجال المغنطيسي في المساحة التي يشغلها.

تعتبر نقطة التدفق من وجهة نظر الفيزياء التقليدية شيئاً يمكن إهماله إلى حد ما. فالجسم المشحون لا يتأثر بالمجال المغنطيسي أو بأية قوة إلا إذا حدث ومر في المنتصف تماماً، وهو أمر بعيد الاحتمال. أما في نطاق ميكانيك الكم فالوضع مختلف تماماً. فالسعة المقابلة لجسيم مشحون يدور حول نقطة تدفق تضرب في معامل β وهذا المعامل يماثل بدقة المعامل الذي سبق مناقشته فيما يتعلق بالإحصاء الكمومي وفي عملية يدور فيها الجسيم المشحون n مرة حول نقطة التدفق، تضرب السعة في المعامل β مرفوعاً للأس n ويتناسب طور المعامل β مع كل من الشحنة والتدفق. وبصرف النظر عن ذلك فإن نقاط التدفق لا تؤثر إطلاقاً في الجسيمات الأخرى.

ومن ثم فإن ربط كمية محددة من الشحنة والتدفق بكل فرد في مجموعة من الجسيمات المتطابقة ينتج منه التأثير نفسه كما لو قمنا بتغيير الإحصاء الكمومي لهذه الجسيمات هذا هو جوهر التقليب الإحصائي، وهو يسمح لنا بتمثيل نوع من الإنيونات كما لو كان نوعاً آخر من الإنيونات مرتبطاً بتدفق وشحنة افتراضيينfictitious.

فإذا وجد كل من التدفق والشحنة أمكن توقع حدوث التقليب الإحصائي. وهناك حالة شائعة تنشئ فيما يعرف باسم النوع الثاني من المواصلات الفائقة type II superconductors . فعند تعريض



يمكن أن يحدث التقليب الإحصائي إذا صادفت الإلكترونات في بعدين مجالاً مغنطيسياً. ويستطيع كل إلكترون «امتصاص» مقدار محدد من المجال (أحمر) فتتحول الإلكترونات أثناء هذه العملية من الفرميونات إلى الإنيونات.

طبقة رقيقة من هذا النوع من المواصلات الفائقة لمجال مغنطيسي، فإنها تسمح للمجال بالاختراق في مناطق محددة. ولأسباب مفاهيمية تمثل كل من هذه المناطق تمثيلاً مثالياً بنقطة تدفق. فإذا افترضنا أن إلكتروناً ارتبط بنقطة التدفق تلك، صار لدينا شحنة مرتبطة بتدفق، وعندئذ يجوز أن نتوقع حدوث تقليب إحصائي.

وفي حالة موصل فائق قياسي تبين أن كمية التدفق خلال نقطة تدفق تصبح كافية تماماً لتقليب إحصاء الإلكترون من فرميون إلى بوزون. وبالتالي حين يكون الإلكترون الحر فرميوناً، فإن الإلكترون المرتبط بنقطة تدفق يعمل كما لو كان بوزوناً.

ولأسباب عديدة، سيكون من الصعوبة ملاحظة التقليب الإحصائي لنقط التدفق في النوع II العادي من الموصلات الفائقة، ولكن الفيزياء المستخدمة وثيقة الصلة بطريقة (هي الفضلى في نظري) من طرق فهم إحدى أهم الظواهر المثيرة للاهتمام في الفيزياء الحديثة وهي مفعول هول المكمى الفركتلي fractional quantized Hall effect (FQHE) وسأستعرض جوهر هذه الظاهرة مع طي كثير من جوانبها الجذابة وتشعباتها التقنية.

قد يتذكر القراء أن بعض الذرات، التي تحوي عدداً معيناً من الإلكترونات هي بوجه خاص مجندة طاقياً ومستقرة. (وهذا يقود إلى وجود العناصر الخاملة inert elements أو الغازات النبيلة noble gas). وبالتشابه فإنه عند كثافات معينة يكون الغاز الإلكتروني electron gas الموجود في بعدين في مجال مغنطيسي، مستقراً على نحو استثنائي وبتعبير أدق ــ وهذا في منتهى الأهمية ــ فإن نسبة كثافة الإلكترونات إلى المجال المغنطيسي المطبق هي العامل الحاسم. ويطلق على هذه النسبة معامل التعبئة filling factor وعند معاملات تعبئة مفضلة تتصرف الإلكترونات كما لو كانت سائلاً بدلاً من سلوكها العادي كغاز مقاومة أي تغيرات في الكثافة.

ويمكن تفهم وجود معامل تعبئة مفضل بطريقة مباشرة إلى حد ما تشبه الطريقة التي فهمنا بها وجود طبقات مغلقة في ذرات غاز خامل. ويعرف معامل التعبئة هذا في العادة بأنه 1 ونشير في هذه الحالة إلى مفعول هول المكمى الصحيح enteger quantized Hall effect وفي عام 1983 وهذا ما أدهش الجميع، اكتشفت قيم فركتلية لمعامل التعبئة وبدقة ــ مثل ثلث القيمة الواضحة المفضلة وثبت أن هذه القيم مفضلة ــ أيضاً على نحو استثنائي. عند هذه القيم يتحول الغاز الإلكتروني إلى وسائل وهذا هو «المفعول FQHE».

هناك طريقة بديعة لفهم هذا المفعول وهي وثيقة الصلة بفيزياء التقليب الإحصائي، ففي الترتيب المخبري المستعمل في دراسة مفعول هول المكمى تتعرض الإلكترونات لمجال مغنطيسي خارجي. وتختلف الإلكترونات موضوع الدراسة تماماً عن الإلكترونات التي تولد المجال المغنطيسي. ومع ذلك تتقلب هذه الإلكترونات إلى إنيونات. وفي الوقت نفسه يحدث تغير في الجزء المعبأ أي في النسبة بين كثافة الإلكترونات والمجال المغنطيسي الخارجي. (ينتج للتغير من امتصاص الإلكترونات لبعض المجال الخارجي). ومن ثم فإن الإلكترونات الأصلية (وهي فرميونات) عند درجة تعبئة معينة، تكون مرتبطة بإنيونات عند درجة تعبئة مختلفة.

وعندما يجمع كل إلكترون المزيد والمزيد من التدفق تتغير الإلكترونات إلى إنيونات من أنواع مختلفة. وإذا قطعت هذه العملية شوطاً كافياً فسوف نعود في النهاية إلى الفرميونات. عند هذه النقطة تلتقي تخيلاتنا بالواقع، لأن التبادل التخيلي لمجال مغنطيسي بتدفق، أدى مرة أخرى إلى حالة مقبولة فيما يخص الإلكترونات الطبيعية (أي الفرميونات). ولكن خلال هذه العملية تغيرت قيمة مجال الخلفية وتغير معها معامل التعبئة. ومن الجدير بالملاحظة أن هذه الطريقة أنجح في توليد حالات، بالضبط عند معاملات التعبئة الفركتلية والتي لوحظ أنها مفضلة.

تتيح لنا نظرية الإنيونات ربط حالتين خاصتين للإلكترونات، ولولاهما لبدا أن لهما طابعاً مختلفاً تماماً، وكذلك ربط حالة مفهومة تماماً بحالة كانت تبدو غامضة بعض الشيء. كما تساعد على أن نفهم بطريقة بسيطة ومقنعة السبب الذي يجعل معاملات التعبئة الملائمة تأخذ هذه القيم بالتحديد.

إن استعمال الإنيونات كأداة فكرية لأمر سار، ولكن ما هو أفضل من ذلك سنوضحه الآن. تظهر الإنيونات أيضاً بطريقة مباشرة في ظاهرة المفعول FQHE وتبعاً للتركيب الذي أوجزته قبل قليل فإن الإلكترونات في هذه الظاهرة هي في الواقع «فرميونات فائقة» superfermions . فإذا حدث تبادل بين إلكترونين فإن طور السعة لا يتغير بالمقدار π فقط المرتبط بالفرميونات دائماً، وإنما (في أبسط حالة، وهي التي يكون فيها معامل التعبئة مساوياً الثلث) يتغير أيضاً بمقدار إضافي هو 2π متعلق بالتدفق المتجمع. ومن ثم فالتغير الكلي في الطور هو 3π. وتوحي هذه الحقيقة، بقوة، بوجوب إمكان تعريف نوع آخر من الإثارة، شبيه بالنقطة، يكافئ بمعنى ما ثلث إلكترون.

وفي الواقع تبين أن هذه الفرضية صحيحة بمعنى قوي جداً. إن أشباه الجسيمات المتعلقة بمعامل التعبئة ثلث المفعول FQHE، تحمل ثلث شحنة الإلكترون ــ وثلث إحصاء الإلكترون! رياضياتيا، عندما يدور شبيه الجسيم حول آخر مثله تضرب السعة في الجذر التكعيبي للرقم (-1) وفي حالات المفعول FQHE ــ التي تظهر عند معاملات تعبئة أخرى ــ تبرز أشباه الجسيمات حاملة أنواعاً أخرى غريبة من إحصاء الإنيونات.

ومن الجائز أن أكثر التطورات إثارة في فيزياء الإنيونات هو إدراكنا حديثاً (بوساطة أعمال (ر. لوكلين) من جامعة ستانفورد، في المقام الأول) أن هناك آلية للسيولة والتوصيل الفائقين - جديدة في جوهرها وشديدة المفعول - مرتبطة بوجود الإنيونات.

إن الخاصيات الأساسية للموصل الفائق هي أن التيارات الكهربية تستطيع أن تسري خلاله، وأنه إذا بدأ هذا السريان فلا توجد طريقة سهلة لكي يتبدد. وأفضل طريقة لإيضاح الخاصية الثانية هي النظر في كيفية تبدد التيار. فمثلاً، في معدن عادي (موصل غير فائق) ينشأ التيار نتيجة حركة عدد كبير من الإلكترونات كل بشكل مستقل تقريباً، استجابة لمجال كهربي. فإذا أزيل هذا المجال الكهربي فإن هذه الإلكترونات سوف تتباطأ نتيجة لتصادم بعضها ببعض. وبهذه الطريقة يتبدد سريان الإلكترونات.

وعلى هذا فإن جانباً رئيسياً للتوصيل الفائق هو وجود تعذُّر التباطؤ التدريجي للجسيمات المفردة، وذلك عن طريق إعطاء طاقتها إلى جسيمات أخرى أو إلى تذبذبات vobrations. وفوق ذلك فإن هذه الجسيمات يجب أن تكون قادرة على الحركة. والسبيل الوحيد للتوفيق بين المطلبين هو وجود حالة منعزلة واحدة فقط طاقتها أقل من طاقة أي حالة أخرى وذلك لكل قيمة ممكنة للتيار الكلي. ونستطيع تخيل هذه الحالة كحالة حركة مترابطة لكل الجسيمات، بحيث لا يكون من المفضل طاقياً لأي جسم منفرد أن يغادرها ويخرج عن الخط. أي إن الطاقة المطلوب فقدها للخروج عن الخط، يجب أن تكون أكبر قليلاً من الطاقة المكتسبة عند التباطؤ.

تمتلك حالات مفعول هول المكمى شيئاً من هذا الطابع. فعند أي معامل تعبئة مفضل يجد المرء حالة فريدة منعزلة منخفضة الطاقة، تكون فيها حركة كل الإلكترونات مترابطة. ولكن، لسوء الحظ فإن مفعول هول المكمى يحدث بوجود مجال الخلفية المغنطيسي، وهو ما يعني أن الجسيمات المشحونة لا تستطيع السريان بالطريقة العادية. ونتيجة لذلك، فإن حالات هول المكماة لا تبدي أكثر نتائج التوصيل الفائق إثارة، على الرغم من أنها فائقة التوصيل بدرجة معينة ضعيفة. ولكن باستخدام فكرة التقليب الإحصائي يمكن ربط هذه الموصلية الفائقة المعيوبة ببعض الموصلية الفائقة الأصيلة. لأنه وفقاً لتلك الفكرة، بوسع المرء أن يقايض - فكرياً - مجالاً مغنطيسياً بإحصاء جسيمي. لنبدأ بحالة من حالات هول الفركتلية المكماة المفضلة، ونقايض المجال الحقيقي كله بتدفق تخيلي مرتبط بالجسيمات، وبذلك نغيرها إلى إنيونات. تحتفظ الحالة الناتجة بطابع عدم التبدد، ومن ثم (لأنه لم يعد هناك مجال حقيقي متخلف) تستطيع السريان. إنها حالة الموصلية الفائقة. إن مثل هذه الحالات تصلح بشكل ممتاز لوصف سلوك المواد التي أشباه جسيماتها هي إنيونات من النوع المناسب.

وقد أظهرت أبحاث مفصلة إضافية سواء من النوع التحليلي أو العددي أن الحالات التي سبق التنبؤ بأنها فائقة السيولة وفقاً لهذا البرهان الكيفي، هي في الواقع كذلك. إن هذه آلية للتوصيل الفائق بالإنيونات قوية جداً، وهي تعمل حتى إذا كانت التفاعلات الأخرى لأشباه الجسيمات تدافعية شديدة.

وبالمقارنة، فإن الآلية التقليدية للموصلية الفائقة من خلال المزاوجة pairing هي آلية دقيقة بعض الشيء. فهي تقتضي تفاعلاً تجاذبياً صافياً من نوع ما. وهو يتطلب بعض المهارة لترتيبه فيما يخص الإلكترونات، وذلك في معظم الظروف بسبب هيمنة قوى التنافر الكولوني Coulomb repulsion بين الإلكترونات. وتعمل هذه الآلية في التوصيل الفائق العادي عن طريق أن أحد إلكتروني الزوج يجذب الأيونات الموجبة المجاورة له، التي تتحرك بسرعة أقل بكثير من سرعته، ويكون غائباً عن موقعه عندما يأتي الإلكترون الآخر للزوج وينجذب بفضل الشحنة الموجبة المركزة. ولكن كل ذلك يمكن أن يحدث فقط إذا كانت البلورة غير مشوشة أكثر مما ينبغي وكان إلكترونا الزوج مفصولين جيداً على نحو موثوق. هذان الشرطان يجعلان عمل هذه الآلية صعباً إذا لم تكن درجات الحرارة شديدة الانخفاض.

هل الموصلات الفائقة المصنوعة من أكسيد النحاس هي من نوع الموصل الفائق الإنيوني؟ هناك عدة إشارات عامة تشجع بالتأكيد هذا النوع من التفكير. إن المميز الرئيسي المشترك للموصلات الفائقة المصنّعة من أكسيد النحاس هو أنها تحتوي على مستويات ثنائية البعد من النحاس والأكسجين. وتبدو هذه البنى الثنائية البعد، التي تبدي نظاماً مغنطيسياً واضحاً من طبيعة لم تُفهم بعد بدرجة كافية، أرضاً واعدة لإنتاج أشباه جسيمات من الإنيونات. وفوق ذلك تتألق حقيقة، هي أن هذه المواد نواقل مفرطة فائقة التوصيل عند درجات حرارة عالية. ويشعر المرء أن مثل هذه الظاهرة المثيرة، التي تبدو نادرة وجديدة كيفياً، تستحق تفسيراً يتصل بالخواص الأساسية للمواد تحت الدراسة.

ومع ذلك فإن المعيار النهائي في العلم ليس في السعادة الجمالية التي نشعر بها من هذه النظريات، بل في مدى المساعدة التي تقدمها لنا تلك النظريات من أجل فهم جوانب خاصة في الواقع. وفي النهاية فإن التجربة وحدها هي التي تستطيع أن تخبرنا ما إذا كانت آلية الإنيونات للموصلية الفائقة عند درجات الحرارة العالية وثيقة الصلة بهذه المواد بالتحديد.

ما التجارب المتصلة بهذا الموضوع؟ إذا كانت الإنيونات فعلاً موجودة في الموصلات نتوقع انكسار تناظُري الندية وانعكاس الزمن في هذه المواد. وإلى الآن لم يستقر الأمر بعد. فبعض التجارب يبدو أنها تشير إلى انكسار هذين التناظرين، ولكن بعضها الآخر - وهو لا يقل في حساسيته عن التجارب الأولى - لا يشير إلى النتيجة نفسها.

ربما صارت نظرية البوزونات والفرميونات قديمة بعض الشيء بعد مرور 60 عاماً من التطور المثمر. وتقدم الإنيونات مثالاً جديداً يُحتذى لسلوك المادة في بعدين. كما أن حالات مفعول هول الفركتلي المكمى هي تجسيد خصب لهذا المثال. وقد علّمتنا الخبرة أن الطبيعة تستخدم بوفرة كل إمكانية بسيطة ومتسقة يقدمها ميكانيك الكم لوصف المادة. ومن ثم فإنني واثق بأن حالات أخرى كثيرة تجسد الإنيون، تنتظر الاكتشاف.

المؤلف

Feank Wilczek

أستاذ في مدرسة العلوم الطبيعية بمعهد الدراسات المتقدمة في برنستون. ألف كثيراً من المقالات العلمية في مجال الفيزياء النظرية وكذلك الكتاب المبسط التوق إلى التناغم Longing for the Harmonies، وهو معروف لإنجازات منها: اكتشاف الحرية المقاربة asymptotic freedom وتطوير التحريك اللوني الكمومي quantum chromodynomics واختراع الأكسيونات axions واكتشاف واستكشاف أشكال جديدة من الإحصاء الكمومي (الإنيونات). حصل على زمالة (ماك آرثر) وجائزة ساكوراي، وهو كذلك عضو في أكاديمية العلوم القومية الأمريكية.

مراجع للاستزادة

The Relationship Between High- Temperature Superconductivity And The Fractional Quantum Hall Effect. R. B. Laughin in Science. Vol. 242. pages 525- 533; October 28. 1988.

Fractional Statistics And Anyon Superconductivity. Frank Wilczek. World Scientific. 1990.

Fractional Statistics: Quantum Possibilitties In Two Dimensions. G. S. Canright and S. M. Girvin in Science, Vol 247. pages 1197- 1205; March 9. 1990.

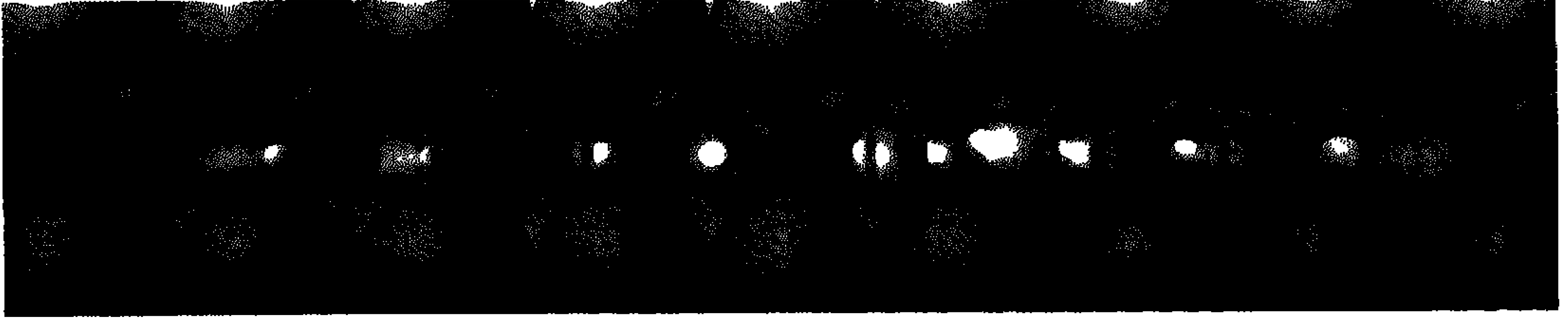
The Hunt For Anyons In Oxide Superconductors Is Ibcobclusive. Barbara Goss Levi in physics Today. Vol. 44. No. 2. pages 17- 20; February 1991.



إلكترونـــات فـي مســـتو

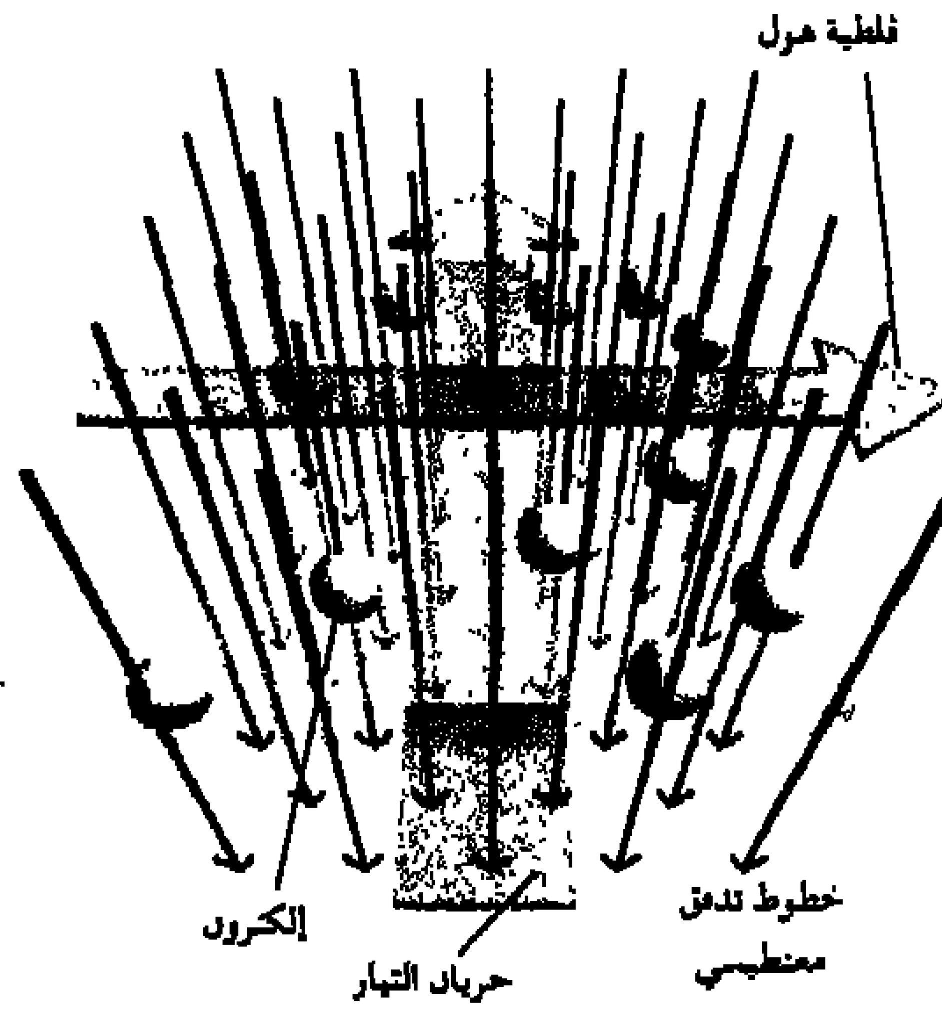
يُمكن لإلكترونات حبست في مستو ذي بعدين أن تُبدي مفعول هول الكمومي، وهو ظاهرة مذهلة يُعتقد الآن أنها ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالموصلية الفائقة.

(س. كفلسن). (د.هـــ. لي). (ش.ش. تسانك)



منذ عصر اليونان القديم، كان الهدف الأساسي لكل الاتجاهات العلمية هو إيجاد مجموعة صغرى من مبادئ أساسية تحكم ضمنياً الظواهر الطبيعية المتنوعة. وقد نجحت هذه الفلسفة الاختزالية نجاحاً حسناً في بعض المجالات مثل فيزياء الطاقة العالية — وهي دراسة الجسيمات الأولية للقوة والمادة. فقد جمع النظريون كل الجسيمات في بضع عائلات (أسر) وصاغوا قوانين الفيزياء الأساسية بدلالة التفاعلات بينها.

إن الوضع في فيزياء الحالة الكثيفة مختلف تماماً، وهو الفرع الذي يدرس الجوامد (الأجسام الصلبة) والسوائل. فقد كشف البحث في سلوك الإلكترونات في الجوامد — خلال هذا القرن — عن حالات مختلفة للمادة، حيث تُرتِّب الإلكترونات نفسها بطرق عديدة جداً. على سبيل المثال، تكون الجوامد بصورة نموذجية إما عوازل (تقاوم جريان التيار الكهربائي مقاومة شديدة) أو فلزات (توصل التيار بصورة جيدة لكنها مازالت تبدي قدراً صغيراً من المقاومة). مع ذلك وضمن ظروف معينة يمكن أن تصبح بعض الجوامد في حالة موصلية فائقة، حيث يجري التيار الكهربائي فيها من دون أية مقاومة على الإطلاق. والتوصيفات النظرية لهـــذه الحالات المختلفـــة متعـــددة الأشكال كتعدد الحالات نفسها.



يظهر مفعول هول الكمومي في مستويين شبه موصلين مبردين حتى درجة حرارة قرب الصفر المطلق (الشكل العلوي)، وقد مُثِّلت الذرات على سطحي شبه الموصلين بكرات خضراء وزرقاء. فعندما يطبق حقل مغنطيسي (الخطوط الحمراء) تُعيد إلكترونات التيار (بالأصفر والتي تتجه داخل الصفحة) توزيعها بحيث يصبح عدد الإلكترونات في جانب (هو الأيمن) أكثر مما هو عليه في الجانب الآخر. وينتج إعادة توزيع الشحنة الكهربائية هذا فلطية محسوسة قابلة للقياس (فلطية هول)، وموصلية عمودية على اتجاه جريان التيار (يظهر في الشكل السفلي). ويشير مفعول هول الكمومي إلى زيادات دَرَجية في الموصلية مع ارتفاع شدة الحقل المغنطيسي.

وقد يتغير هذا الأمر قريباً. فقد وجد الباحثون ارتباطاً وثيقاً بين الموصلية الفائقة وموضوع آخر درس دراسة مستفيضة في فيزياء الحالة الكثيفة هو: مفعول هول الكمومي. تحدث هذه الظاهرة عندما تخضع الإلكترونات لشروط ثلاثة معينة في الوقت نفسه: فهي حبيسة سطح فاصل بين بلورتين شبه موصلتين، بحيث إنها لا تستطيع الحركة إلا في بعدين فقط «منبسط» ومبرَّدة حتى درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق، وخاضعة لحقل مغنطيسي عال. يُسبب الحقل المغنطيسي جَرْف الإلكترونات جانبياً بالنسبة لاتجاه جريان التيار. فينشأ نتيجة لذلك فلطية (جهد) جانبية أو قوة تدفع الإلكترونات جانبياً. وإذا ازداد الحقل المغنطيسي ازدادت هذه الفلطية أيضاً، ولكن ليس بصورة خطية، بل سيزداد بصورة درجية بالضبط. تدعى هذه الظاهرة مفعول هول الكمومي وتُعدّ سمة (بصمة) لطور مميز جديد للمادة.

أدرك الفيزيائيون عندما اكتُشف مفعول هول الكمومي عام 1980 أن خواص الإلكترونات في هذه الحالة الغريبة جداً تختلف اختلافاً أساسياً عما هو معروف من حالات المادة المعروفة الأخرى كلها، لكن آخر الاكتشافات في هذا المجال أماط اللثام عن علاقة بارزة بين مفعول هول الكمومي وظاهرة الموصلية الفائقة المألوفة، حتى

إن دراسات هذه الصلة قادت إلى تنبؤات لأطوار جديدة أخرى للمادة أكدتها التجارب حديثاً.

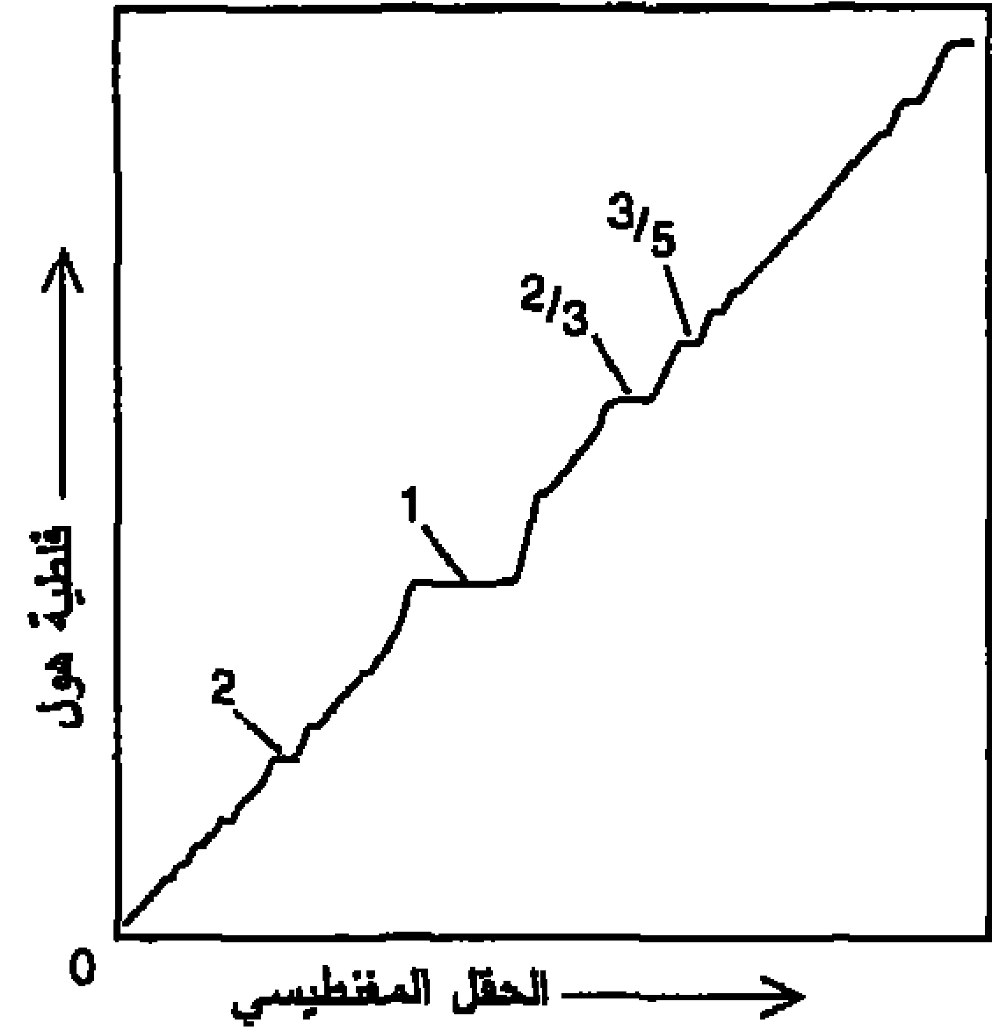
قد لا يكون لمفعول هول الكمومي أية قيمة عملية مباشرة، مع ذلك فقد أسهم في ازدهار وتطوير مفاهيم جديدة وأدوات رياضياتية نظرية. سيكون لهذه الأدوات مضامين ذات تطبيقات واسعة في الفيزياء، بطريقة مماثلة لما قدمته نظرية الموصلية الفائقة من مساعدة في تقديم فيزياء الجسيمات الأولية وكما أسهمت دراسة الانتقالات الطورية إسهاماً كبيراً في فهم الكون الحديث الولادة.

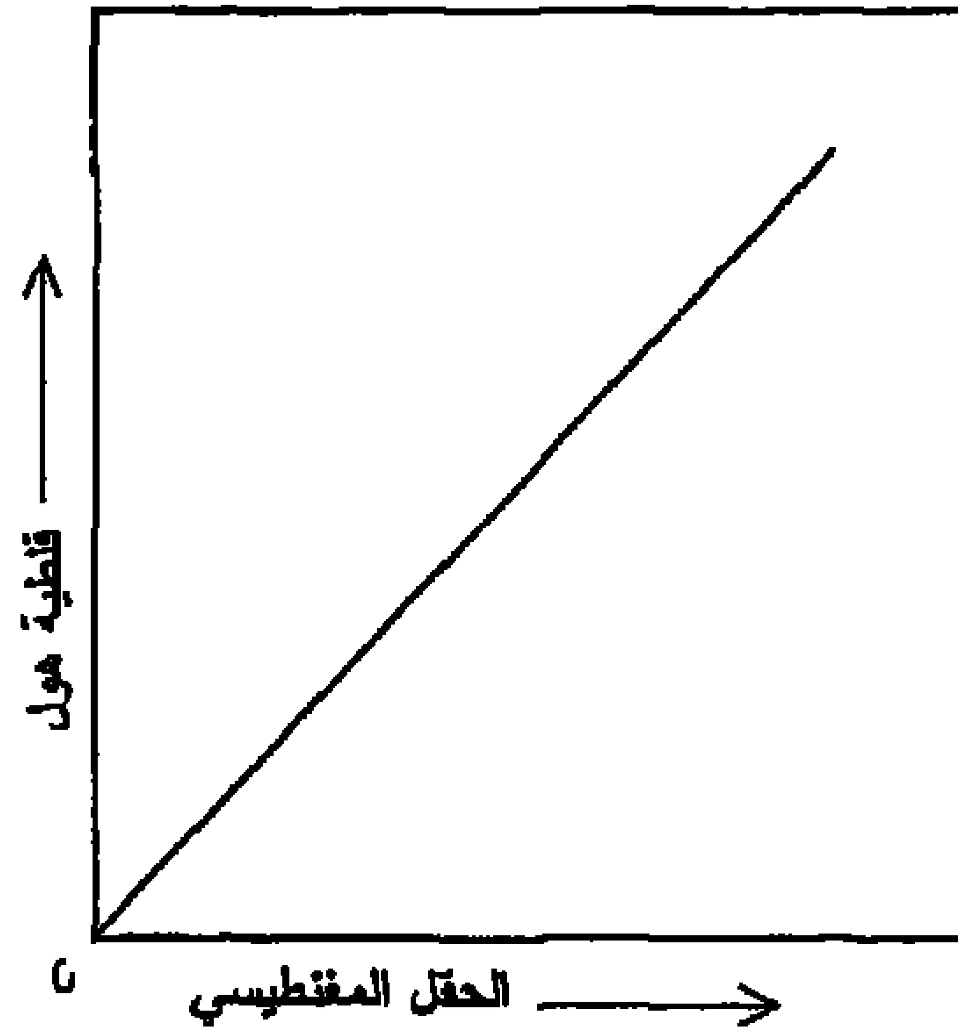
وتزودنا الاكتشافات الخاصة بمفعول هول الكمومي أيضاً بنظرة فاحصة في الطرائق المذهلة لسلوك العالم تحت الذري، وتحفز هذه الدراسات النظريين إلى صياغة نظرة أكثر كمالاً عن العالم الطبيعي. إضافة إلى ذلك، قد تثبت المبادئ المعنية أهميتها في تحضير أجيال قادمة من الأجهزة الإلكترونية الدقيقة شبه الموصلة. إن سعينا لجعل هذه الأجهزة أصغر فأصغر سيوصلنا في النهاية إلى أبعاد يصبح عندها ميكانيك الكم والتفاعلات بين الإلكترونات بالغة الأهمية ولا بد من أخذها في الاعتبار عند التصميم.

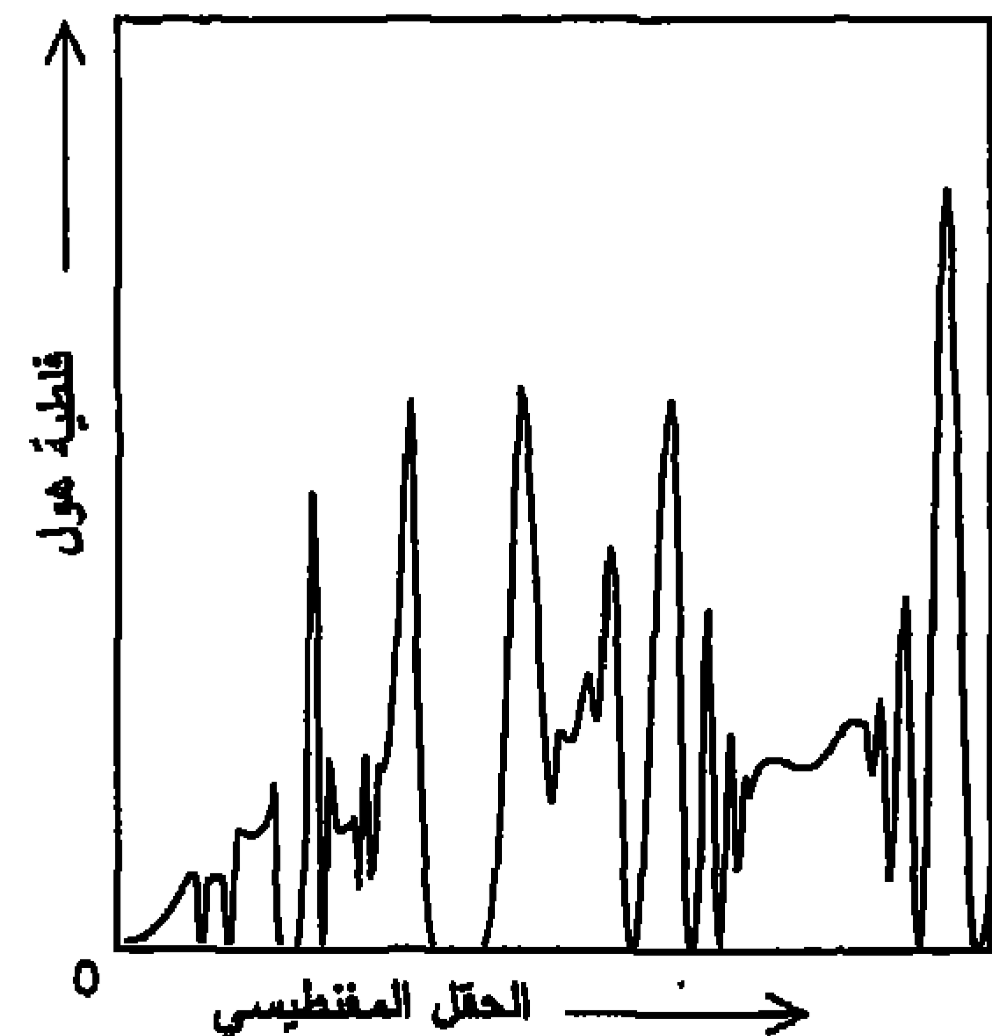
اكتشاف مفعول هول الكمومي:

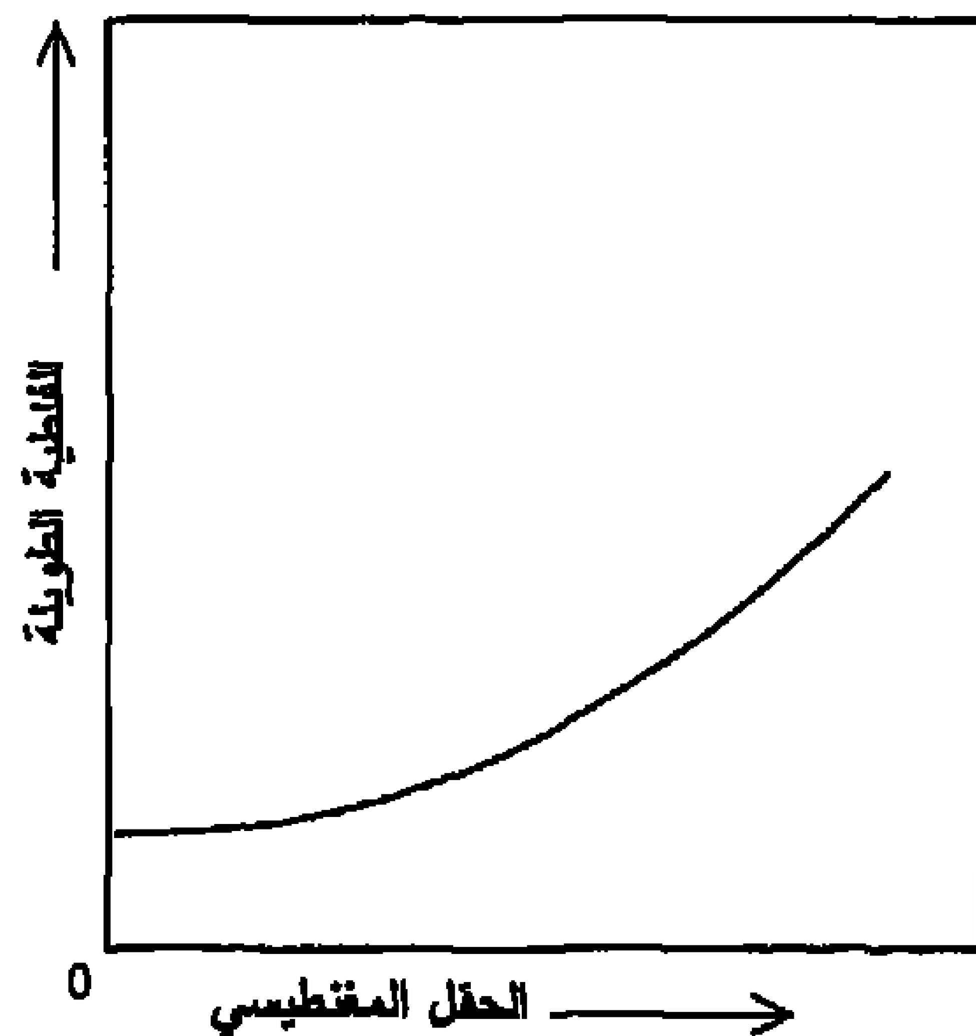
تبين أن مفعول هول الكمومي مظهر غير عادي لظاهرة معروفة أعم في التوصيل الكهربائي اكتشفها العالم الأمريكي (إدوين هـ. هول) في القرن التاسع عشر. فعندما تطبق فلطية كهربائية بين طرفي سلك يبدأ التيار بالجريان. وإذا أُخضع السلك حينئذ إلى حقل مغنطيسي ستعاني الإلكترونات الجارية قوة (مغنطيسية) جانبية. وتعمل هذه القوة على إعادة توزيع الإلكترونات بصورة غير منتظمة ـ وينتهي بها المطاف ليتجمع عدد كبير من الإلكترونات في الجانب الأيمن من السلك وقليل منها ينتهي في الجانب الأيسر.

وينتج من التوزع غير المنتظم فلطية كهربائية عمودية على اتجاه التيار. وكي نكشف هذه الفلطية الجانبية (وهي فلطية هول)، نربط وببساطة مجسي أداة قياس عادية، مثل مقياس الفلط (الفلطمتر)، إلى طرفي السلك. ومن أجل قيمة ثابتة للتيار تزداد فلطية هول تزايداً سلساً مع زيادة الحقل المغنطيسي. وتعرف هذه الظاهرة الآن باسم مفعول هول التقليدي (الكلاسيكي).









تظهر سمات مفعول هول الكمومي لدى مقارنة قياسات محددة بمثيلاتها العائدة لمفعول هول التقليدي (غير المكمّم). ففي مفعول هول التقليدي تتغير الفلطية في الاتجاه الجانبي (فلطية هول) بصورة سلسة مع تغير الحقل المغنطيسي، في حين تتغير الفلطية في النسخة الكمومية مظهرة عتبات مقابل موصلية تساوي عدداً صحيحاً معيناً وكسوراً من ثابت أساسي (يلاحظ فقط بضعة مضاعفات). أما في الاتجاه الموازي لجريان التيار فتتغير الفلطية الطولية بصورة سلسة مع تغير الحقل المغنطيسي في المفعول التقليدي، في حين تختفي هذه الفلطية في المثيل الكمومي عندما تظهر في فلطية هول.

في عام 1980 اكتشف العلماء (ك. فون كليتزنك) (الذي كان يعمل حينذاك بمختبر الحقول المغنطيسية العالية في مؤسسة ماكس بلانك في كرينوبل) و(م. بِبّر) (من جامعة كامبردج) و(ج. دوردا) (من مختبر أبحاث سيمنس في ميونخ) أن مفعول هول ــ تحت شروط خاصة ــ لا يخضع للقواعد العادية. ويعود الفضل في ذلك الاكتشاف للتقدم الحاصل في أشباه الموصلات، حين أصبح من الممكن حبس مجموعة من الإلكترونات بين بلورتين شبه موصلتين بحيث لا تستطيع هذه الإلكترونات الحركة إلا في مستو فرد فقط. وعندما برّد الباحثون هذه الإلكترونات الحبيسة حتى درجة أو درجتين فوق الصفر المطلق، وجدوا أن فلطية هول لا تزداد بسلاسة مع ازدياد شدة الحقل المغنطيسي.

عوضاً عن ذلك، ازدادت فلطية هول على شكل درجات (عتبات) أي لا تتغير قيمتها أبداً ضمن مجال صغير من شدات الحقل المغنطيسي. إضافة إلى ذلك فقد انعدمت تقريباً الفلطية الطولية ــ تلك الفلطية اللازمة للإبقاء على جريان التيار ــ مقابل كل عتبة من العتبات الحاصلة في فلطية هول. وبتعبير آخر تصبح الإلكترونات في بعدين «موصلة كاملة». (إنها ليست فائقة التوصيل من الناحية التقنية لأن إلكترونات الموصلية الفائقة تستطيع إضافة إلى ذلك أن تطرد الحقل المغنطيسي، في حين أن هذه الإلكترونات الموصلة الكاملة لا تطرد الحقل المغنطيسي).

وقد يكون من المدهش أكثر أن تأخذ كمية تسمى موصلية هول قيماً خاصة. إن موصلية هول هي النسبة بين قيمة التيار الطولي وقيمة فلطية هول. وقد خلص فون كليتزنك وزملاؤه إلى أن قيمة موصلية هول عند كل عتبة تساوي عدداً صحيحاً مضروباً بـ (كمّ الموصلية)، وهي وحدة تساوي 1/25812.8 مقلوب الأوم (إذ إن الموصلية هي مقلوب المقاومة). إن كم الموصلية هو e^2/h (حيث يشير e إلى شحنة الإلكترون، وh إلى ثابت بلانك الذي يربط بين تردد (تواتر) شعاع ضوئي بأصغر كمية من الطاقة يمكن أن يحملها)..وقد نال فون كليتزنك جائزة نوبل في الفيزياء عام 1985 لاكتشافه «مفعول هول الكمومي الصحيح» هذا.

في عام 1982 واجه البحاثة (د.س. انسوي) (وهو الآن في جامعة برنستون) و(هـ.ل. شتورمر) (من مختبرات بل التابعة للشركة AT&T) و(آ.س. كوسارد) (وهو الآن في جامعة كاليفورنيا بسانتا باربرا) خاصية أخرى غير متوقعة لمفعول هول الكمومي. إذ اكتشفوا أن فلطية هول تصبح على شكل عتبة عدداً من المرات أكثر مما كان يعتقد في البدء، فتصبح أفقياً عند قيم كسرية معينة من كمّ الموصلية مثل 1/3 و2/5 و3/7 منها. وليس غريباً إذاً أن يطلق على هذه الظاهرة اسم مفعول هول الكمومي الكسري.

لم تُظهر أي تجربة حتى الآن انحرافاً عن العلاقة بين موصليات هول المقيسة والقيم المكمّاة. فقيم كمّ الموصلية هي نفسها حتى جزء واحد على الأقل من 10 ملايين (أي حتى سبع مراتب عشرية)، ويشير دليل غير مباشر إلى أنها متساوية حتى جزء من 100 بليون جزء. وبسبب هذه الدقة العالية تبنت المؤسسة القومية للمعايير والتقانة مفعول هول الكمومي معياراً لتدريج أدوات قياس المقاومة.

معاملات الملء (التعبئة) السحرية:

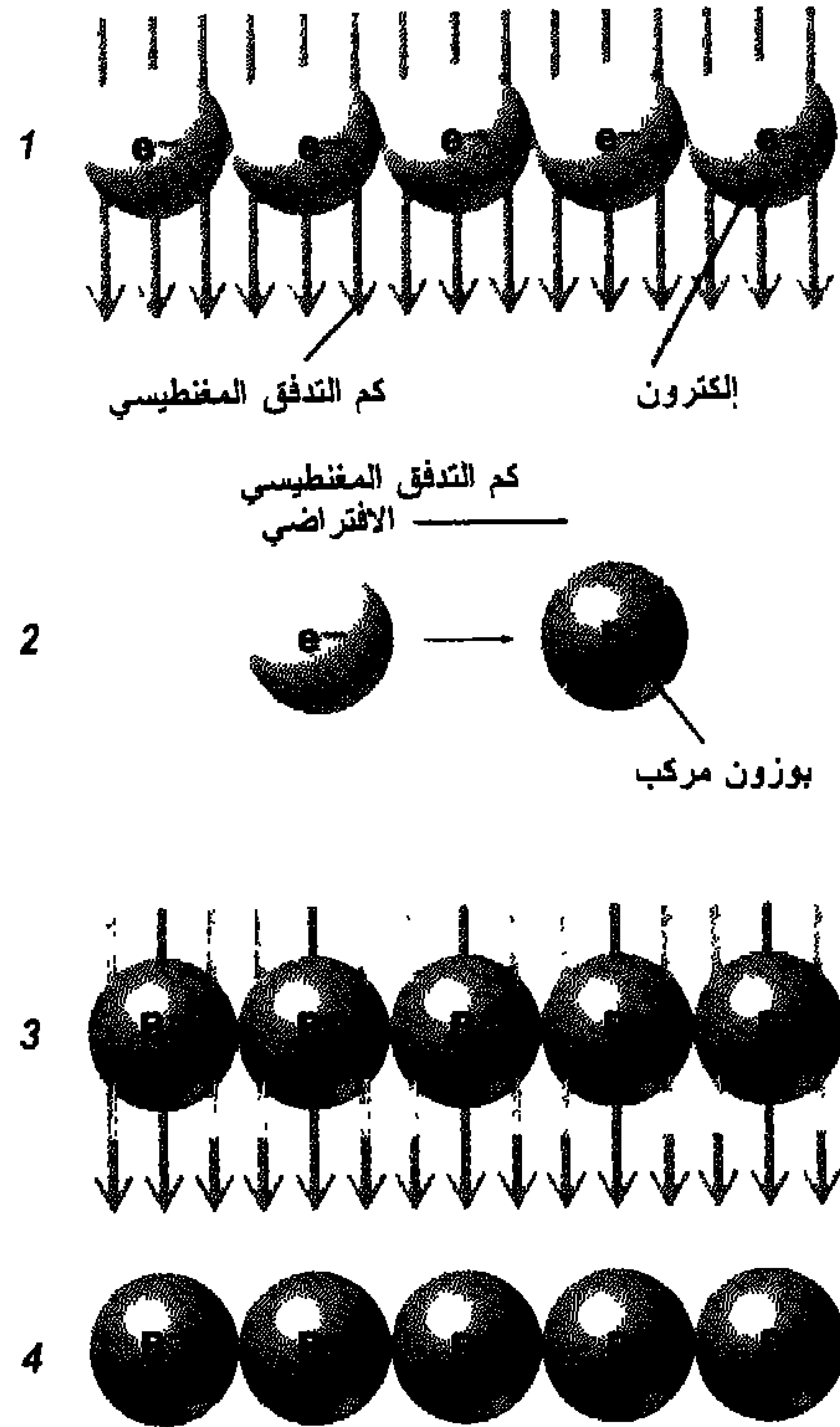
والسؤال الآن لماذا تأخذ موصلية هول هذه القيم «السحرية»؟ لقد أمضى الباحثون سنوات عديدة محاولين حل هذا اللغز. ويرتبط الجواب، كما سنرى، بشدة الحقل المغنطيسي المؤثر في كل إلكترون.

نحتاج لفهم الحل إلى معرفة ثلاثة أشياء حول كيفية وصف الفيزيائيين للحقول المغنطيسية، الأول: يمثل ميكانيك الكم شدة الحقل المغنطيسي الفاعلة في عينة بدلالة وحدة تدعى كم التدفق (الفيض) المغنطيسي. إن إحدى الطرق لتصور كمّ التدفق هي أن نتخيله مثل السهم. وبالتالي لقياس شدة الحقل المغنطيسي، ما على المرء إلا حساب عدد كمّات التدفق ــ الأسهم ــ النافذة عبر العينة خلال سطح معطى.

الثاني: هو كمية هامة أخرى مرتبطة بشدة الحقل المغنطيسي تسمى معامل الملء (التعبئة) وهو عدد الإلكترونات في عينة مقسوماً على عدد كمات التدفق المغنطيسي العابرة للعينة. وعندما يكون معامل الملء مساوياً الواحد يكون هناك كم تدفق واحد لكل إلكترون، وعندما يكون معامل الملء مساوياً 1/3 تكون موصلية هول $1/3e^2/h$ وهكذا.

مقارنة بين الموصلية الفائقة ومفعول هول الكمومي

الموصلية الفائقة	مفعول هول الكمومي
الإلكترونات المتزاوجة (أزواج كوبر) هي حاملات الشحنة الرئيسية.	البوزونات المركبة هي حاملات الشحنة الرئيسية.
توصيل كامل.	توصيل كامل في الاتجاه الطولي.
استمرار مع وجود حقل مغنطيسي وفي مواد تحوي عيوباً.	تظهر عتبات هول مكمّاة وتبقى قيمتها على ما هي ضمن مدى صغير من شدات الحقل المغنطيسي.
تستبعد الإلكترونات حقولاً مغنطيسية ضعيفة.	تقاوم الإلكترونات تغيراً في كثافتها عندما تخضع لحقل مغنطيسي ثابت، وهي خاصة تدعى اللاانضغاطية.
تكمية التدفق في الحلقات الفائقة (وهي خاصة التوصيل، مما يوجب عليها احتواء عدد صحيح من كمّات التدفق المغنطيسي)	شحنة كسرية (تقابل تكمية للشحنة الكهربائية على شكل وحدات هي أجزاء من شحنة الإلكترون).



يمكن لبوزونات مركبة أن تمثل الإلكترونات في مفعول هول الكمومي. على سبيل المثال، يوجد مقابل القيمة 1/3 لما يعرف باسم عامل الملء ثلاثة كمات تدفق (وهي مقياس لشدة الحقل المغنطيسي) لكل إلكترون (1). تصور المؤلفون هذا الشرط مطبقاً على بوزونات مركبة، وهي جسيمات مشحونة لها ثلاثة كمات تدفق مغنطيسية (افتراضية) (2). إن توجيه التدفق الافتراضي معاكساً التدفق المغنطيسي الحقيقي (3) يلغي الحقل المغنطيسي الذي «يراه» كل بوزون (4)، مما يُسهّل نمذجة مفعول هول الكمومي.

وفي البداية فسَّر (ر.ب. لوفلين) الذي يعمل الآن في جامعة ستانفورد، عتبات موصلية هول مستخدماً نموذجين رياضياتيين مثاليين منفصلين: أحدهما لمعاملات الملء الصحيحة والآخر لمعاملات الملء الكسرية. واعتمد تفسيراه الخارقان (وتفسيرات آخرين) على الدوال الموجية: وهي الدوال الرياضياتية التي تصف كل ما يمكن معرفته حول حالة الجسيمات الكمومية.

وعلى الرغم من نجاح مقاربة لوفلين في بعض التفسيرات فقد تُركت أسئلة عديدة من دون إجابة. إذ اعتمدت على تبسيطات معينة يصعب تطبيقها على مواد واقعية محتوية على عيوب وتشوهات. كما أن الدوال الموجية هي أشياء مجردة لذا كان من الصعب تصور تفسيرات لوفلين. ولم تتمكن مقاربته من الإشارة إلى وجود أية علاقة بين مفعول هول الكمومي وأنواع أخرى من النشاطات الإلكترونية في الجوامد. أخيراً وبسبب التشابه بين مفعولي هول الكموميين الصحيح والكسري يبدو من المرجح وجوب معالجتهما على قدم المساواة وليسا منفصلين.

لقد استطعنا مستفيدين من التشابه الرياضياتي الدقيق بين مفعول هول الكمومي والموصلية الفائقة، تطوير طريقة جديدة لفهم مفعول هول الكمومي. وإلى جانب توحيد ظاهرتين تبدوان متباعدتين، يمكّن هذا التشابه الفيزيائيين من تطبيق معلوماتهم من الموصلية الفائقة على مفعول هول الكمومي. وتتكامل هذه المقاربة مع مقاربة لوفلين وتتضمن الكثير من النبوءات المستقاة من عمله. لكنها منفصلة تماماً عنها، فهي تُركز على خواص حقيقية ماكروية (كبرية) قابلة للمشاهدة للمنظومة الفيزيائية المدروسة وليس على خواص مكروية (صغرية) يصعب تصورها لمنظومة مثالية.

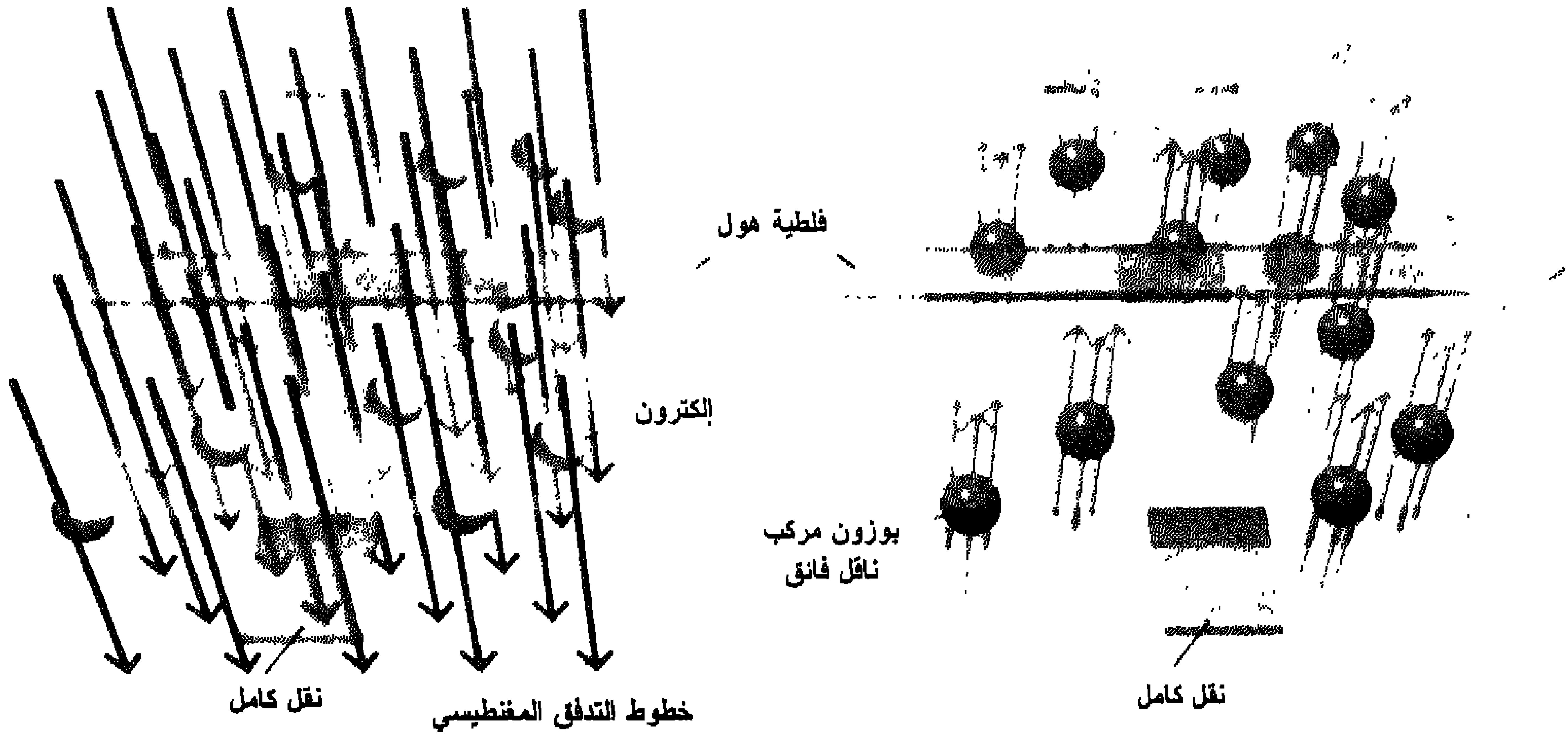
حدثت الخطوات الأولى في هذا الاتجاه الجديد عام 1987، حينما لاحظ (س.م. كرڤن) و(أ.هـ. ماك دونالد) (وكلاهما الآن في جامعة إنديانا) أن الدوال الموجية المستخدمة لتفسير مفعول هول الكمومي يمكن النظر إليها كالدوال الموجية الممثلة لحالة الموصلية الفائقة لكن لنوع جديد من الجسيمات المتخيلة سميت البوزونات المركبة. وقد تقدم بملاحظة مماثلة بعد هذا بقليل الباحث (ن. ريد) الذي يعمل الآن في جامعة ييل.

بوزونات وفرميونات:

البوزونات هي إحدى أسرتين، يصنف الفيزيائيون جميع الجسيمات في إحداهما اعتماداً على «الإحصاء» الذي تتبعه كل منهما، أو على سلوكهما الجماعي. فتبقى الدالة الموجية التي تصف تجمعاً (جمهرة) من البوزونات هي نفسها عندما يتبادل جسيمان مكانيهما. أما الأسرة الأخرى من الجسيمات فهي الفرميونات، حيث تبدل دالتها الموجية إشارتها (من الموجب إلى السالب أو العكس بالعكس) حين يتبادل جسيمان مكانيهما.

إن الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات هي كلها فرميونات. ويمكن للذرة التي تحوي الأنواع الثلاثة أن تعامل معاملة جسيم (مركب) وحيد. ويعتمد كونها فرميوناً أو بوزوناً على العدد الإجمالي لمكوناتها. فإذا كان هذا العدد فردياً كانت الذرة فرميوناً، أما إذا كان زوجياً كانت الذرة بوزوناً. فالنظير المسمى الهيليوم -4 مثلاً يحوي إلكترونين وبروتونين ونيوترونين مما يجعله بوزوناً. خلافاً لذلك، فنظير الهيليوم -3 لديه إلكترونان وبروتونان ونيوترون واحد فقط فهو لذلك فرميون.

تختلف الفرميونات عن البوزونات في نواح عدة. وأكثر هذه الاختلافات صلة بهذه المقالة القواعد التي تحكم إشغال الحالات الميكانيكية الكمومية. فالفرميونات تخضع لمبدأ الاستبعاد لپاولي الذي يمنع فرميونين من أن يشغلا الحالة نفسها ــ فلا يمكن لهما بصورة رئيسة أن يكونا في المكان نفسه في اللحظة الزمنية نفسها. ولا تنطبق هذه القاعدة على البوزونات؛ إذ يمكن أن توجد بوزونات عديدة في الحالة نفسها تماماً.



ينتج تفسير مفعول هول الكمومي لإلكترونات معاملُ ملئها 1/3 (في اليسار) بمجرد أن تلغي البوزونات المركبة الحقل المغنطيسي الخارجي (في اليمين، حيث لم يُرسم الحقل المغنطيسي المُلغى بغية الوضوح). تصبح البوزونات المشحونة الباردة عند غياب الحقل المغنطيسي موصلات فائقة، مما يفسر التوصيل الكامل في الاتجاه الطولي. وتظهر فلطية هول بسبب التحريض (الحث): إن التدفق المغنطيسي الافتراضي المتحرك يولّد جهدا جانبياً.

تشرح هاتان الخاصيتان، المختلفتان اختلافاً أساسياً للفرميونات وللبوزونات، العديد من المشاهدات في الفيزياء. والمثال الجيد على ذلك الاختلاف المذهل بين موصل فائق وفلز عادي. إذ يمكن فهم التوصيل الكهربائي للفلزات العادية مباشرة بدلالة خواص الفرميونات (والإلكترونات بالتحديد)، بالمقابل فإن الموصلية الفائقة هي من خواص البوزونات.

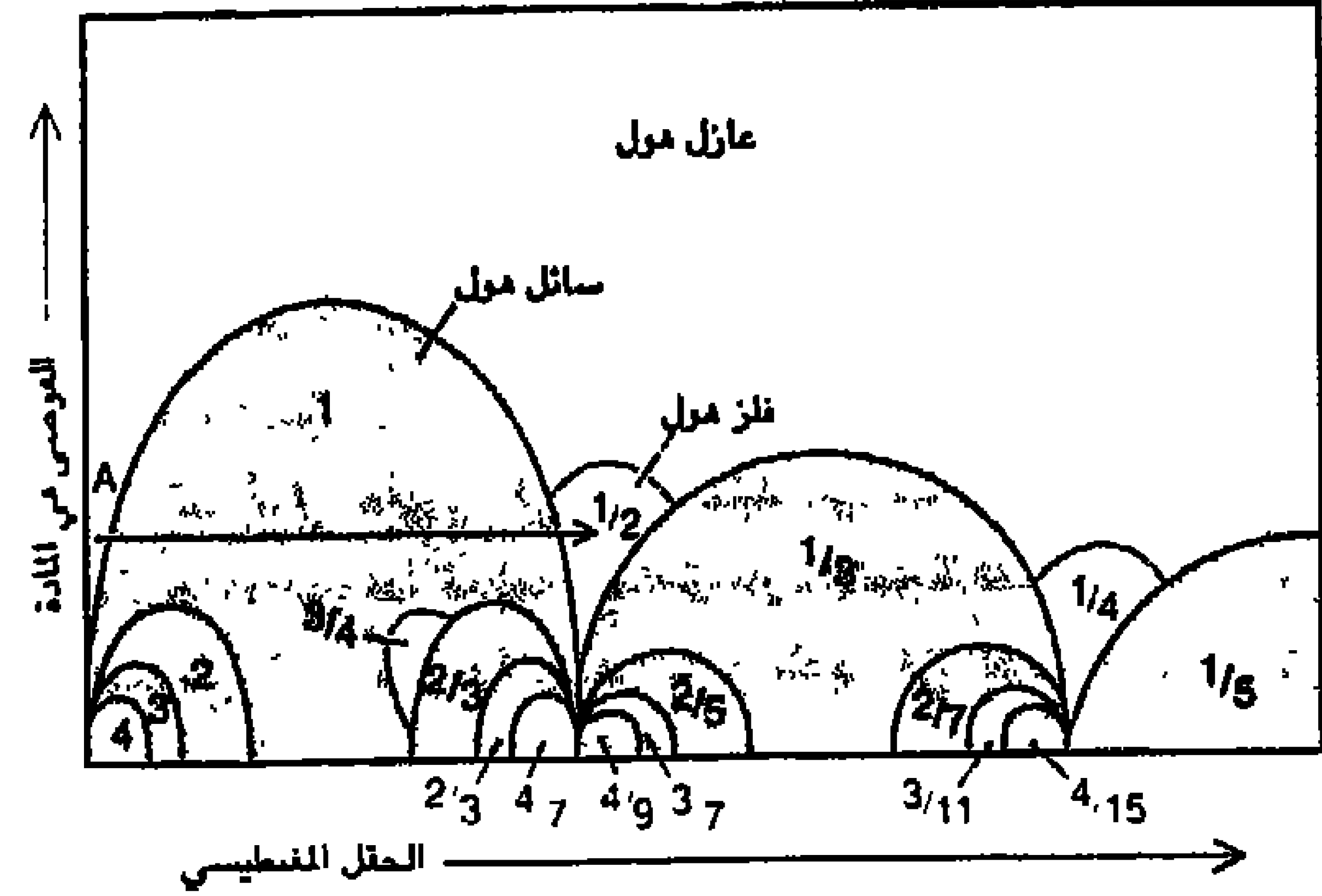
وكيف يكون ذلك، مادامت حاملات التيار الكهربائي في جميع الأجسام الصلبة (الجوامد) هي الإلكترونات التي هي فرميونات؟ الجواب هو أنه في طور الموصلية الفائقة تتجاوز الإلكترونات قواعد الفرميونات بتزاوجها. ويسلك كل زوجين سلوك بوزون، ويمكن لهذه الأزواج كلها أن تتكاثف في المستوى الكمومي نفسه لينتج من ذلك الموصلية الفائقة. أما في حالة الفلز العادية فتحتفظ الإلكترونات بفرديتها، أي ذاتياتها الفرمونية. وبسبب كونها فرميونات يمكنها أن توجد في مستويات مختلفة كما يتطلب ذلك مبدأ الاستبعاد لباولي وبالتالي فهي تفشل في التوصيل الفائق.

لقد أدخل النظرية التي تستخدم البوزونات المركبة لشرح أثر هول الكمومي عام 1989 اثنان منا (تسانك وكفلسن) ومعنا (ت.هـ. هانسون) وهو الآن في جامعة ستوكهولم. ويمكن اختصار ما فعلناه بصورة مبسطة حيث افترضنا أن الإلكترونات المتحركة في بعدين والخاضعة لحقل مغنطيسي شديد، تكافئ من الناحية الرياضياتية تجمعاً من بوزونات مركبة في حقل أضعف شدة بكثير. وفي شروط خاصة ــ وبخاصة عندما يصل معامل الملء قيمة سحرية ما (وبالتحديد 1 أو 1/3 أو 1/5) ــ فإن الحقل المغنطيسي الذي تعانيه البوزونات المركبة هو في الواقع صفر. ونقول في هذه الحالة إن البوزونات المركبة تصبح، في مدى مجال عريض من الظروف، موصلة فائقة. ثم بيَّنا بعد ذلك أنه بمجرد أن تصبح البوزونات المركبة موصلة فائقة فإنها ستؤدي إلى ظهور موصلية هول المكمّاة.

بعد ذلك، عمَّم (م.ب. فشر) ــ وهو الآن في جامعة كاليفورنيا بسانتا باربرا، ومعه واحد منا (لي) ــ وبصورة منطقية هذه النظرية لتشرح وتأخذ في الحسبان جميع عتبات هول المكماة والأكثر تعقيداً، مثل تلك المقابلة لـ 2/5 و3/7. وقد شكلت هذه الأعمال أساس الأبحاث التالية التي قام بها ثلاثتنا معاً لدراسة مفعول هول الكمومي ضمن شروط متباينة.

إلكترونات كبوزونات مركبة:

تستند نظرية البوزونات المركبة إلى تكافؤ رياضياتي بين إلكترونات تتحرك في بعدين وتجمّع من البوزونات تحمل معها حزمة تدفق مغنطيسي افتراضي. وقد تبين أنه حتى تقلد البوزونات المركبة إحصاء فرمي للإلكترونات، يجب أن يحمل كل بوزون عدداً فردياً من كمّات تدفق حقل مغنطيسي افتراضية. (ويظهر استخلاص أكثر دقة لهذا التمثيل في المساحة المخصصة لمجلة ساينتفيك أمريكان في (أمريكا على الخط «مباشرة» America Online).



تُعرض حالات جديدة للمادة من أجل إلكترونات في بعدين في مخطط طوري. فمن أجل قيمة معطاة لحقل مغنطيسي ولمستوٍ معين من الفوضى (النقطة A) تسلك الإلكترونات سلوك «عازل هول» (الأخضر)، الذي له مميزات عازل وفلز في الوقت نفسه، وعند شدات حقول مغنطيسية أعلى تتحول الإلكترونات إلى سلوك «سائل هول» (الأزرق) ـــ أي إنها تظهر مفعول هول الكمومي ـــ ثم تصبح بعدها «فلز هول» (البني الفاتح). تدل الأرقام على القيم الصحيحة والكسرية لموصلية هول المكماة.

قد يوضّح المثال آثار التدفق المغنطيسي الافتراضي بصورة أفضل. لننظر في مثال يقابل قيمة محددة لأحد معاملات الملء التي تظهر عندها عتبة في فلطية هول ـــ ولتكن 1/3. إن معامل الملء هذا يعني أنه توجد ثلاثة كمات من كمات التدفق المغنطيسي الحقيقي لكل إلكترون. ولننظر الآن لكل إلكترون ليس على أنه فرميون، بل على أنه بوزون مركب مرتبط بثلاثة كمات من التدفق الافتراضي. نوجه بعد ذلك كمات التدفق الثلاثة هذه في اتجاه معاكس للحقل المغنطيسي الخارجي. فيكون المحصل النهائي للتدفق الذي تراه البوزونات هو مجموع التدفقات الحقيقية والافتراضية. وبما أننا وجهنا التدفق الافتراضي بحيث يلغي أثر التدفق الحقيقي فلن يعاني البوزون أي محصّل نهائي من التدفق. ومن المعروف أنه في درجات الحرارة المنخفضة تقوم البوزونات وفي غياب الحقل المغنطيسي بالتوصيل الفائق. ونتوقع أن يصح الشيء نفسه في حالة البوزونات المركبة الباردة عند معامل الملء 1/3.

والسؤال الآن لماذا تتضمن الموصلية الفائقة للبوزونات المركبة توصيلاً كاملاً في اتجاه التيار وموصلية هول المكماة في الاتجاه العمودي؟ إن الإجابة عن الشطر الأول سهلة، إذ إنه بسبب كون البوزونات المركبة الفائقة التوصيل لا تحتاج إلى فلطية للإبقاء على جريان التيار فإن المرء يجد توصيلاً كاملاً.

أما الإجابة عن الشطر الثاني فتحتاج إلى حذاقة أكثر. لنتذكر أن كل بوزون مركب جار يحمل معه عدداً فردياً من كمات التدفق المغنطيسي الافتراضي. لذلك إذا جرت البوزونات سيجري معها كمات التدفق المغنطيسي وجوباً. غير أن التدفقات المغنطيسية المتحركة (وحتى الافتراضية منها) ستولد فلطية كهربائية عمودية على اتجاه جريانها (تعرف هذه الخاصية باسم قانون فاراداي في التحريض الكهرمغنطيسي). يضاف إلى ذلك، أن هذا الجهد الجانبي متناسب طردياً مع كمية التدفق الافتراضية الكلية الجارية عبر العينة في كل ثانية. لذلك تكون قيمة تيار التدفق المغنطيسي ثلاثة أضعاف التيار الكهربائي من أجل معامل ملء يساوي 1/3. وهذا بدوره يفسر كون موصلية هول مساوية 1/3 كمّ الموصلية.

ومن وجهة النظر هذه، يقع الاختلاف الوحيد بين معاملات الملء السحرية المختلفة ـــ كونها 1 أو 1/3 أو 1/5 ـــ في عدد كمات التدفق المغنطيسي الافتراضية التي يحملها كل بوزون مركب. يضاف إلى ذلك، أن موصلية هول المكماة (مثل 1 و1/3 و2/5 وغيرها مضروب بـــ e^2/h) تعتمد فقط على النسبة بين الشحنة والتدفق في البوزون المركب وليس على تفصيلات المادة التي تشاهد فيها هذه البوزونات.

يوضح النموذج الذي يستخدم بوزونات مركبة أيضاً سبب بقاء موصلية هول ثابتة حتى عندما يبتعد عامل الملء ابتعاد قليلاً عن قيمة سحرية. فلننظر في حالة كون معامل ملء الإلكترون أكثر قليلاً من 1/3. يلغي التدفق الافتراضي، في هذه الحالة، التدفق الحقيقي بصورة جزئية فقط، فيعاني البوزون المركب حقلاً مغنطيسياً محصّلاً صغيراً. لكن البوزون المركب الفائق التوصيل سيتحمل، كما هي الحال في الموصلات الفائقة الحقيقية، حقلاً مغنطيسياً صغيراً. وبالتالي فإن موصلية هول لن تتغير ضمن مدى صغير بجوار معامل الملء 1/3.

ويتعمق التشابه بين الموصلية الفائقة ومفعول هول الكمومي أكثر من ذلك. مثلاً، إن قابلية الموصل الفائق لطرد الحقل المغنطيسي تترجم إلى قابلية مقاومة الإلكترونات المشاركة في مفعول هول الكمومي لأي تغير في المساحة الكلية التي تشغلها (فيقال عن إلكترونات مفعول هول بأنها «غير قابلة للانضغاط»). ونجد لجوانب أخرى أكثر تعقيداً في الموصلية الفائقة مشابهات في مفعول هول الكمومي.

خريطة لإلكترونات في منبسط:

لقد قام ثلاثتنا بدراسة مفعول هول الكمومي مستخدمين نظرية البوزون المركب في ظروف واسعة المدى. وتمثل نتائج هذه الدراسة بما يعرف باسم مخطط الطور يستخدم الفيزيائيون عادة مخطط الطور لتلخيص سلوك مادة ما تحت شروط مختلفة. على سبيل المثال، يمكن تحت ضغوط ودرجات حرارة مختلفة لتجمع من جزيئات الماء أن يصبح سائلاً أو جليداً أو بخاراً. ويمكن رسم مخطط يوضح هذه الأطوار ليشير إلى الحالة الفيزيائية لجزيئات الماء على مدى معين من الضغوط ودرجات الحرارة.

في مخطط الطور لإلكترونات في بعدين نستخدم شدة الحقل المغنطيسي ودرجة عدم الاكتمال أو الفوضى في بلورات أشباه الموصلات التي تحبس الإلكترونات، وذلك بدلاً من الضغط ودرجة الحرارة. وقد حصلنا على مخطط من هذا النوع انطلاقاً من مخططات الطور للموصلات الفائقة المعروفة. وقد أعطى مسح Mapping المعلومات استناداً إلى مخطط طور الموصل الفائق بنية متشابكة جميلة.

قادت نظرية البوزونات المركبة لمفعول هول الكمومي أيضاً إلى تنبؤ حالة غير متوقعة، حيث تتخذ الإلكترونات خواص عازل وفلز في الوقت نفسه. وقد أيدت هذا التنبؤ لعازل هول، تجربة حديثة أجراها كل من (هـ.و. يانك) و(ك.ل. وانك) من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس وكذلك (س.ت. هنه) من جامعة ولاية فلوريدا. فعندما زادت درجة عدم الاكتمال في أشباه الموصلات على قيمة معينة، ظهرت الحاجة إلى فلطية عالية جداً للإبقاء على جريان التيار نفسه. وكانت الحاجة إلى فلطية أكبر تتزايد بصورة مستمرة كلما انخفضت درجة الحرارة باتجاه الصفر المطلق ـــ وهذه من مميزات العازل. وعلى النقيض من ذلك، فقد بقيت فلطية هول مستقلة عن درجة الحرارة وازدادت مع ازدياد شدة الحقل المغنطيسي ـــ وهذه من مميزات الفلز.

وقد أسفرت التجارب التي أجراها كل من يانك وتسوي وشتورمر و(ل.ن. بفايفر) و(ك.و. وست) (من مختبرات بل التابعة للشركة AT&T) وآخرين عن مفاجأة أخرى ـــ كانت هذه المرة بالقرب من عامل الملء 1/2. فقد اكتشف الفيزيائيون في هذه الحالة أن الإلكترونات قد تأثرت وكأنها في فلز عادي وليست تحت تأثير حقل مغنطيسي. وكان من بين السمات الأخرى ظهور عدم تكمية موصلية هول بل وجدت متناسبة مع الحقل المغنطيسي تناسباً خطياً.

ويعتمد تفسير مثير للاهتمام لما يسمى «فلز هول» على فكرة النظر إلى الإلكترون وكأنه فرميون مركب. يشبه الفرميون المركب البوزون المركب إلا أنه يحمل عدداً زوجياً من كمات التدفق المغنطيسي الافتراضية، مما يؤدي إلى خضوعها إلى إحصاء فرمي. وقد قدّم بحاثة عديدون مثل هذه الأفكار معتمدين جزئياً على مفهوم قدمه لأول مرة (ج.ك. جين) من جامعة ولاية نيويورك في ستوني بروك. ومن هؤلاء البحاثة ريد و(ب.إ. هالبرين) (من جامعة هارفارد) و(ب.أ. لي) من معهد ماساتشوستس للتقانة) بصورة مستقلة، و(ف. كالمير) الذي كان يعمل سابقاً في مركز أبحاث ألمادن التابع للشركة IBM، وواحد منا (تسانك).

إن ميزة البوزونات المركبة والفرميونات المركبة هي في أنها تربط ما يظهر وكأنه سلوك غريب لإلكترونات في بعدين بسلوك مألوف لجسيمات مركبة. ويُطرح غالباً سؤال بخصوص ما إذا كانت هذه الجسيمات المركبة هي حقيقية أم أنها تراكيب مفيدة لا يمكن عزلها ودراستها منفردة، مشبهةً بذلك الكواركات في فيزياء الطاقة العالية. لقد سببت هذه المناظرة ظهور أبحاث كثيرة غير أنه لم يحن بعد قطاف نتائج جازمة.

يبقى مفعول هول الكمومي، وبعد انقضاء ست عشرة سنة على اكتشافه، واحداً من أهم مجالات البحث المثيرة في فيزياء المادة الكثيفة. وقد زودتنا غنى الظواهر المتنوعة بأسس لاختبار أفكار نظرية عديدة. وقد ظهرت صورة شمولية توحّد فهم هذه الظواهر وظواهر أخرى في منظومات المادة الكثيفة. مع ذلك، وعلى الرغم مما أُحرز من تقدم، تبقى بعض الطروحات الحرجة غير محلولة. على سبيل المثال، مازال عازل هول وفلز هول عصيّين على الفهم الكامل. كذلك لا يُعرف معرفة كاملة حتى الآن كيف يمكن ملاءمة خواص أخرى للإلكترونات مثل السبين (حركتها المغزلية) Spin مع هذه الصورة.

لقد أشار هالبرن في مقالة سابقة في مجلة ساينتفيك أمريكان عام 1986 إلى هذا الموضوع فقال «إن الأهمية الفعلية لمفعول هول الكمومي ليس في أية.. تطبيقات، لكنها في نفاذ البصيرة التي يكتسبها الفيزيائيون عند النظر في خواص معينة لمنظومات من الإلكترونات خاضعة لحقل مغنطيسي شديد وفي الانتظامات المخبأة المحتواة في القوانين الرياضياتية لميكانيك الكم. فقد تملك الطبيعة في مخزونها حالات مدهشة للمادة لم يتخيلها أي منا حتى الآن». والآن وبعد عشر سنوات وجد الفيزيائيون بعض هذه الحالات، ونأمل في اكتشاف المزيد.

المؤلفون

S. Kivelson –D-H. Lee – Sh-Ch Zhang

تعاونوا في رسم العلاقة بين ظاهرة الموصلية الفائقة ومفعول هول الكمومي. شغل كفلسن، الذي حصل على الدكتورا من جامعة هارفارد، مناصب في مؤسسات عديدة قبل أن يستقر في منصب الأستاذية في الفيزياء بجامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس. أما لي فقد حصل على الدكتوراه من معهد ماساتشوستس للتقانة (MIT) ثم عمل في مختبرات الشركة IBM في مركز أبحاث (ت. ج. واطسون) قبل أن ينضم إلى الكلية بجامعة كاليفورنيا في بركلي. يعمل تسانك أستاذاً مشاركاً بجامعة ستانفورد، وقد حصل على الدكتوراه من جامعة الولاية بنيويورك في ستوني بروك. كما شغل قبل ذلك مناصب في جامعة كاليفورنيا بسانتا بربارا وفي مركز أبحاث ألمادن التابع للشركة IBM.

مراجع للاستزادة

QUANTIZED HALL EFFECT. Bertrand I. Halperin in *Scientific American*, Vol. 254, No. 4, Pages 40-48;April 1986.

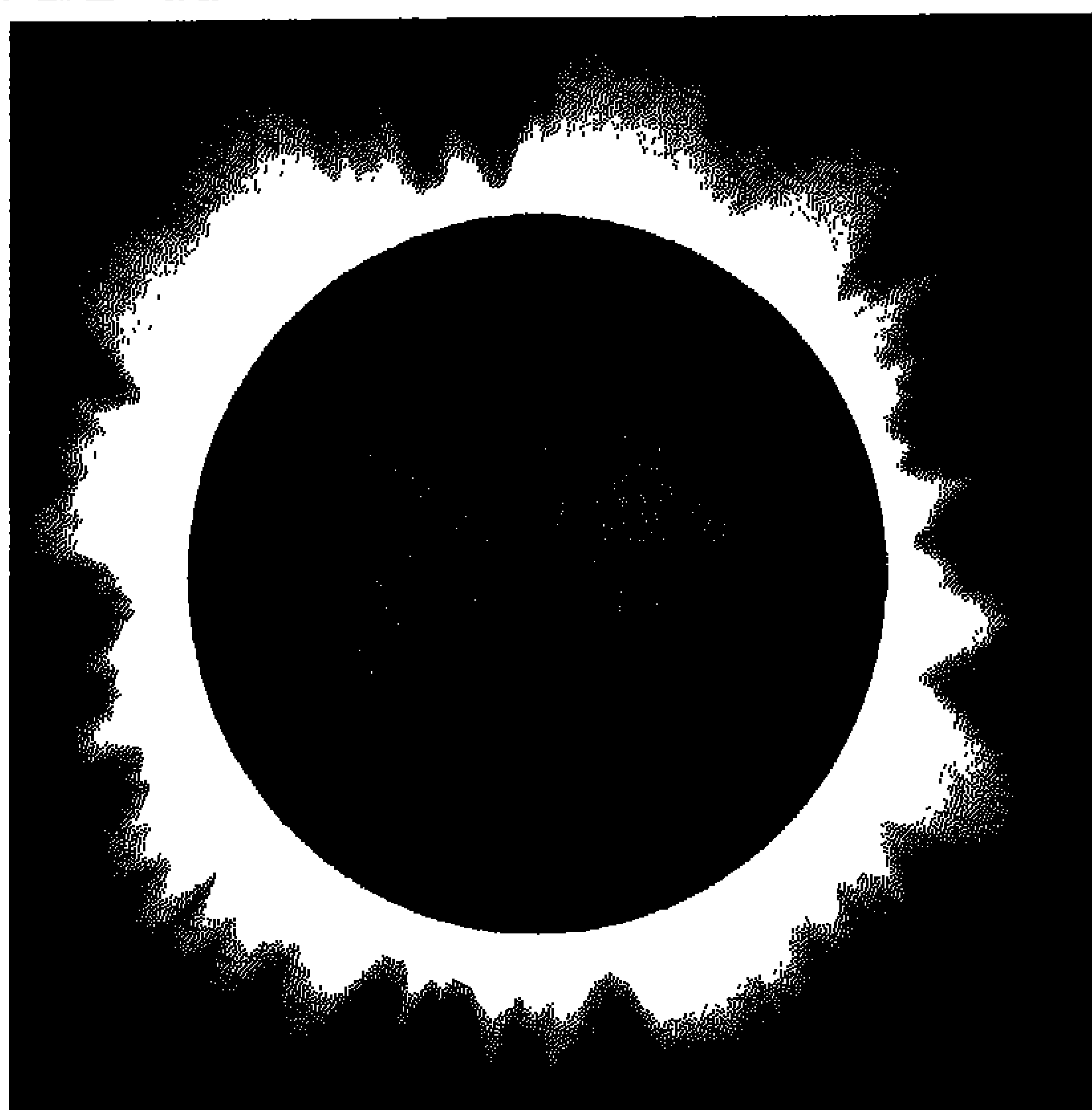
ANYONS, Frank Wilzcek in *Scientific American*, Vol. 264, No. 5, Pages 24-31; May 1991.

THE CHERN-SIMONS-LANDAU-GINZBURG THEORY OF THE FRACTIONAL QUANTUM HALL EFFECT. Shou-Cheng Zhang in *International Journal of Modern Physics* B, Vol.6, No. 1, Pages 25-58; January 1992.

GLOBAL PHASE DIAGRAM IN THE QUANTUM HALL EFFECT. S. KIVELSON, D.-H. Lee and S.-C. Zhang in *physical Review* B, Vol. 46, No. 4, Pages 2223-2238; July 15, 1992.

الباب الخامس 5

الطبيعة والحياة





الثقب الأوزوني فوق القارة القطبية الجنوبية

في كل فصل ربيع من العقد المنصرم، كانت الطبقة الأوزونية في الجو ترق في القطب الجنوبي. فهل هذه الخسارة أمر عابر، أم أنها إشارة إلى أن كل الطبقة الأوزونية المحيطة بالأرض والتي تمتص الأشعة فوق البنفسجية عرضة للخطر.

(ر.س. ستولارسكي)



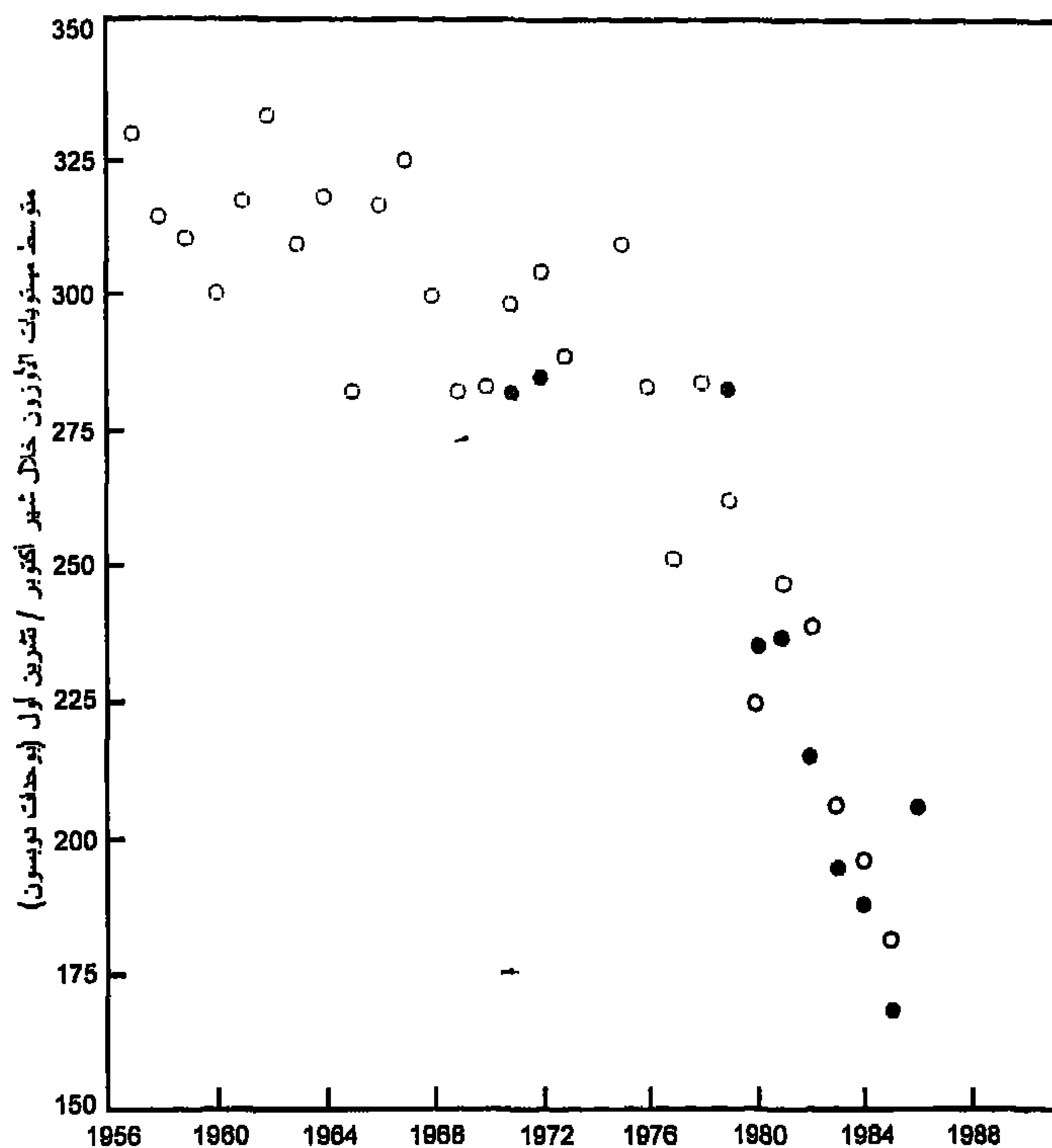
125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500 525

متوسط مستويات الأوزون خلال شهر أكتوبر / تشرين أول (بوحدات دوبسون)

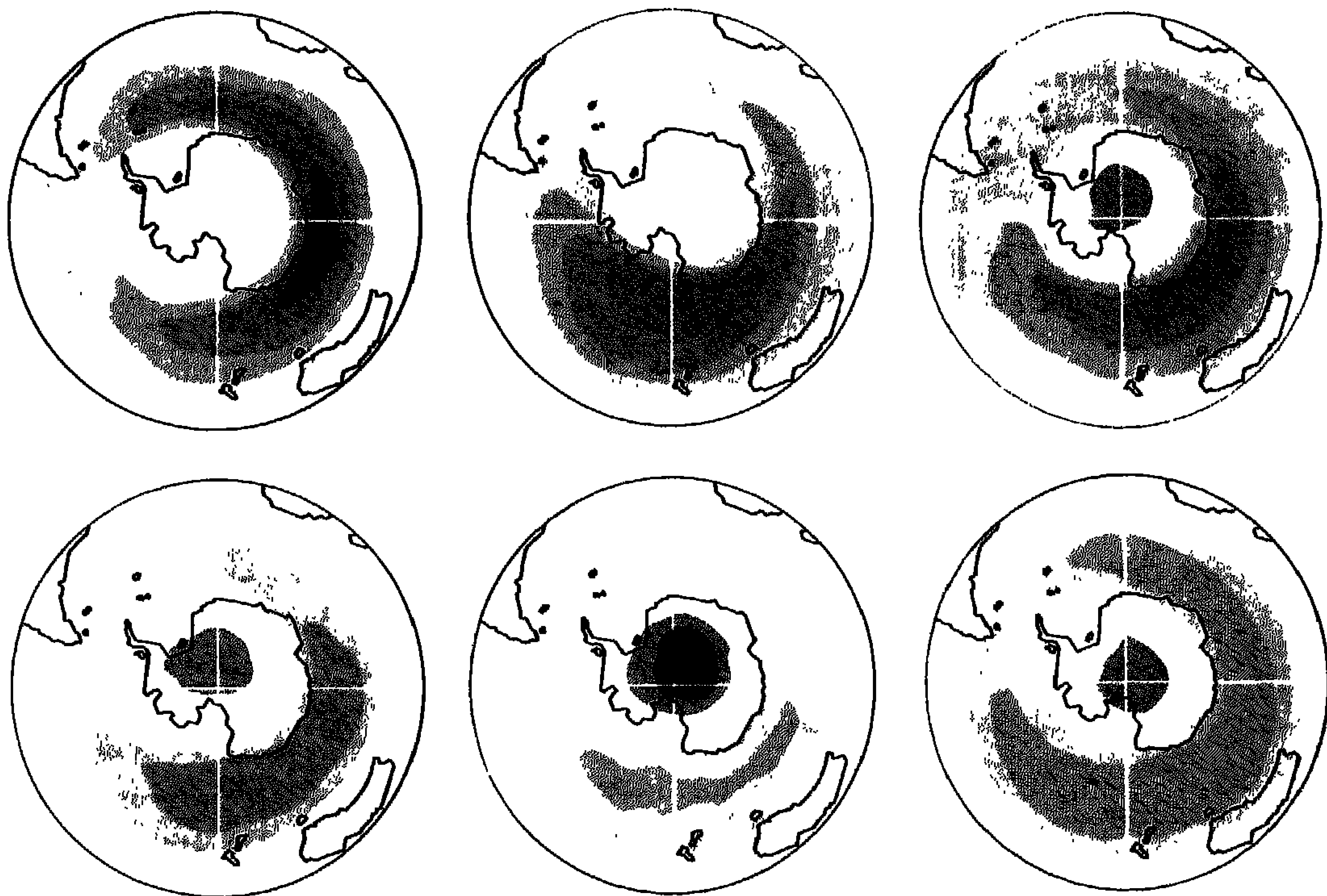
هذه خريطة لمستويات الأوزون في جو نصف الكرة الجنوبي في اليوم الخامس من أكتوبر/ تشرين أول عام 1987، وهي تسلط الضوء على «الثقب» الأوزوني الربيعي (بالألوان الأسود والأحمر الوردي والأرجواني) فوق القارة القطبية الجنوبية. تقارب مقادير الأوزون في الثقب نصف ما كانت عليه في السبعينيات، إذ بلغ معدلها وقتذاك 300 وحدة دوبسون، وتساوي كل من هذه الوحدات جزءاً من مئة من المليمتر، وهي تبين ثخانة الطبقة الجوية الناتجة إذا ما تم جمع الأوزون في شريحة من الجو عند درجة الحرارة والضغط المعياريين. والخريطة مبنية على المعطيات المأخوذة من (مطياف تخطيط الأوزون الكلي) Total Ozone Mapping Spectrometer المحمول على متن القمر الصناعي (نيمبوس 7) Nimbus 7 التابع للهيئة الوطنية لإدارة أبحاث الملاحة الجوية والفضاء (ناسا).

في عام 1985، أعلن علماء الجو العاملون في دائرة المسح البريطانية للقارة القطبية الجنوبية عن اكتشاف غير متوقع كليّاً، إذ وجدوا أن مقادير الأوزون الربيعي في الجو الذي يعلو خليج «هالي» Halley في القارة القطبية الجنوبية قد انخفضت بنسبة تتجاوز 40 في المئة بين عامي 1977 و1984. وسرعان ما أيدت التقارير مجموعات أخرى وبينت أن منطقة نضوب الأوزون كانت في الواقع أوسع من القارّة، وأنها امتدت في ارتفاعها مسافة تراوح بين 12 و 24 كيلومتراً تقريباً، طاغية على قسم كبير من الجزء السفلي من طبقة الستراتوسفير. وخلاصة القول إنه كان في الجو القطبي «ثقب» أوزوني.

لقد أزعج هذا الاكتشاف العلماء وجماهير الناس على حدٍّ سواء، ذلك أنه أوحى بأن الطبقة الستراتوسفيرية للأوزون المحيطة بالأرض قد تكون في خطر أكبر ممّا تنبأت به النماذج الجوية. إن التآكل الجارف لهذه الطبقة سيكون سبباً لاهتمام بالغ، إذ أنّه على الرغم من كون الأوزون، وهو جزيءٌ مكون من ثلاث ذرات من



كان أول من بيّن الانخفاض (في الأسفل) في مستوى الأوزون الربيعي فوق القارة القطبية الجنوبية هو (ج.س. فارمان) Joseph C. Farman وزملاؤه من دائرة المسح البريطانية للقارة القطبية الجنوبية، الذين راقبوا مستويات الأوزون فوق خليج هالي مباشرة منذ عام 1956 (الدوائر المفتوحة). وبعد أن نشر هؤلاء الباحثون تقريرهم عام 1985، أيدته (ناسا) بالاستعانة بقمر صناعي (النقاط الغامقة). وقد بينت معطيات أخرى جمعتها (ناسا) أن منطقة نضوب الأوزون أوسع من القارة القطبية الجنوبية، وهي محاطة بمنطقة غنية بالأوزون (الهلال). وهذه الخرائط، التي أعيد رسمها بغية مزيد من الوضوح، تستند إلى معطيات تخطيط الأوزون الكلي. ويشير اللون إلى قدر يراوح بين 150 و180 وحدة دوبسون، ويليه بترتيب تصاعدي، اللون الرمادي ثم الألوان الزرقاء المتزايدة الدكنة.



الأكسجين، يؤلف أقل من جزء واحد في المليون من الغازات في الجو، فإنه يمتص معظم الأشعة فوق البنفسجية الصادرة عن الشمس، مما يؤدي إلى منعها من الوصول إلى الأرض. ومثل هذا الإشعاع ذو طاقة عالية لدرجة تكفي لتحطيم جزيئات بيولوجية مهمة، بما فيها «الدنا» DNA: ويمكنه زيادة الإصابة بسرطان الجلد، و(السّدُّ العيني) Cataract (وهي عتمة تصيب عدسة العين البلورية أو محفظتها)، ونقص المناعة، كما يمكنه أيضاً إلحاق الأذى بالمحاصيل والنظام البيئي المائي.

ونظراً إلى ما تنطوي عليه هذه الآثار من خطورة بالغة، فإن عديداً من الباحثين، بمن فيهم زملائي وأنا من الهيئة الوطنية لإدارة أبحاث الملاحة الجوية والفضاء NASA، تسابقوا إلى تحديد أسباب الثقب الذي يكبر في كل ربيع يحل في نصف الكرة الجنوبي داخل (الدائرة القطبية) Polar Vortex، وهي كتلة هوائية معزولة تدور حول القطب الجنوبي خلال جزء كبير من العام. (إن كمية الأوزون ضمن الدارة القطبية تتناقص في أواخر أغسطس/ آب وأوائل سبتمبر/ أيلول، وتستقر في أكتوبر/ تشرين أول، ثم تتزايد في نوفمبر/ تشرين ثاني). وإلى أن نُحيط بسبب تشكل الثقب، فسنظل عاجزين عن تحديد ما إذا كان قابلاً للامتداد إلى مناطق أخرى، أو أنه سيبقى محصوراً في طبقة الستراتوسفير فوق القارة القطبية الجنوبية، حيث تنفرد الأحوال الجوية بصفات استثنائية.

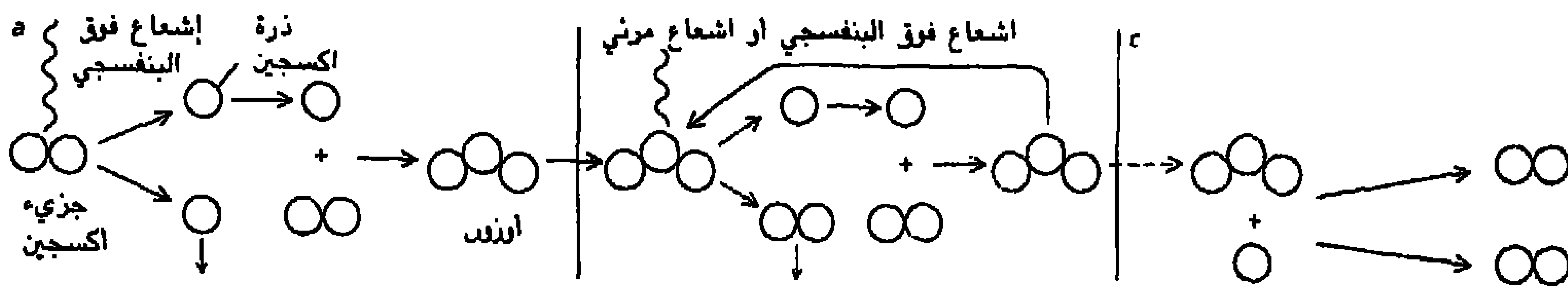
لقد أفادت الجهود البحثية من عدة أدوات قياس: بعضها مثبت على سطح الأرض، وبعضها الآخر محمول على مناطيد وأقمار صناعية. فأجهزة القياس المحمولة على مناطيد، تفحص بصورة عامة كيمياء الهواء الذي تطير فيه، أمّا المعدات الأرضية المحمولة على الأقمار الصناعية، فهي تقوم بأرصاد عن بعد، كقياس سُمك الطبقة، أو العمود، الذي قد ينتج إذا ما جعلنا كل الأوزون ــ الذي يعلو مباشرة راصداً على سطح الأرض ــ في درجة الحرارة والضغط المعياريَّين. وبغية الحصول على السُمك، الذي يُسجّل عادة بوحدات (دوبسون) Dobson، أو بأجزاء من مئة من المليمتر، فإن الباحثين يقيسون الإشعاع الذي يضرب الأرض بأطوال موجية تبايُنها زهيد، يمتص الأوزون بعضها فقط بشدة. (تسجل الأجهزة المحمولة على الأقمار الصناعية الضوء المنعكس). فإذا ازدادت كمية الإشعاع ذي الأطوال الموجية التي تُمتص، بالنسبة لكمية الإشعاع ذي الأطوال الموجية التي لا تمتص، فإن كمية الأوزون تكون قد نقصت. وبالعكس، فإذا نقص الإشعاع ذو الأطوال الموجية التي تُمتص، يكون الأوزون قد ازداد.

لقد اجتذبت هذه البحوث موارد دولية. ففي عام 1987، مثلاً، اجتمع في «بونتا آريناس» Punta Arenas بجمهورية تشيلي نحو 150 عالماً ومعاونيهم من الموظفين يمثلون 19 منظمة وأربع دول للقيام بأعظم دراسة طموحة جرت الآن، ألا وهي تجربة فحص أوزون القارة القطبية الجنوبية بالأجهزة المحمولة جواً. وهذه التجربة، التي بينت أن الثقب الأوزوني كان في أوجه عام 1987، لم تستخدم أجهزة قياس أرضية وأخرى محمولة على أقمار صناعية ومناطيد فحسب، بل اشتملت أيضاً على مختبرات محمولة جواً. فقد قامت طائرة ركاب مُعدلةٌ من طراز DC-8، وطائرة ER-2، وهي نموذجٌ معدل من الطائرة العسكرية U-2، بعدة اختراقات لمنطقة نضوب الأوزون ابتغاء جمع معلومات مفصلة عن حجم هذه المنطقة وكيميائها.

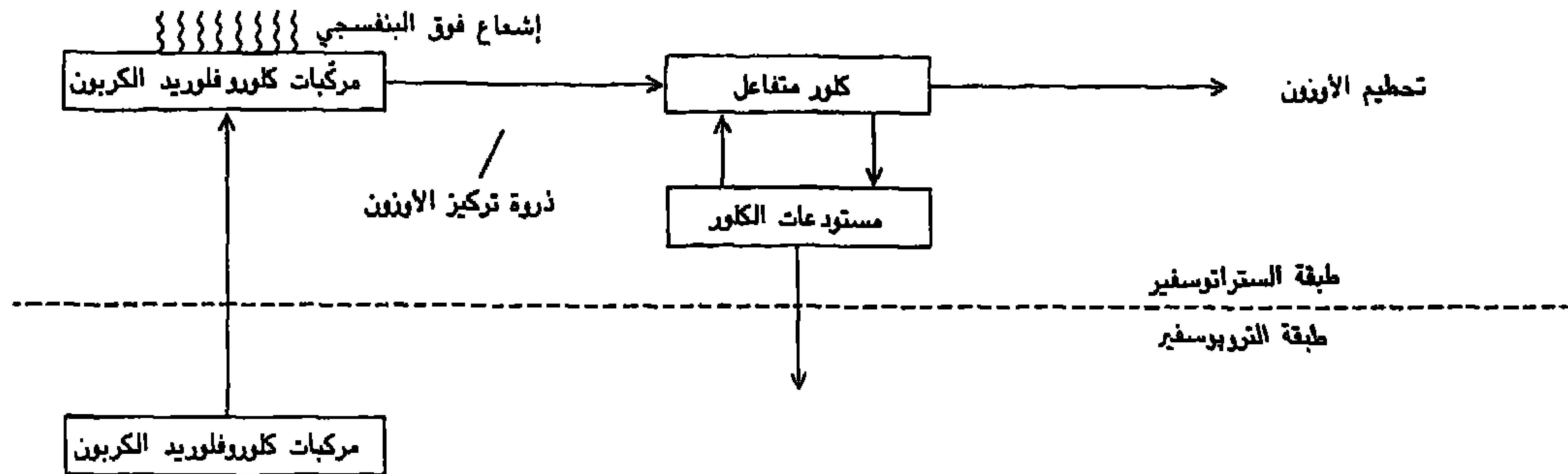
إن حملة عام 1987، مثلها مثل دراسات حديثة أخرى، ركزت على التعليلين الرئيسيين للثقب الأوزوني. فإحدى النظريات تفترض أن الملوثات سبب في حدوث هذا الثقب، في حين تؤكد نظرية أخرى حدوث تغير طبيعي في حركات الهواء التي تنقل الهواء الغني بالأوزون إلى طبقة الستراتوسفير القطبية خلال فصل ربيع نصف الكرة الجنوبي.

وفي الواقع، فقد سبق الاهتمام بالملوثات أي دليل على الضرر الذي يمكن أن ينجم عنها. ففي عام 1971، عندما كان يُتوقع أن يكون لطائرات النقل فوق الصوتية وجود رئيسي في الأجواء، أبدى عديد من الباحثين قلقاً من أنه قد يكون لبخار الماء وأكاسيد النتروجين (NO_x) الصادرة عن هذه الطائرات تأثير ضار في الجو عند الارتفاعات العالية. فقد بينت الدراسات المختبرية أن بإمكان كل من هذين النوعين من الغاز أن يهاجم الأوزون. وما حدث هو أن أساطيل الطائرات فوق الصوتية لم تتحقق أبداً، لكن في السنوات التي تلت، فإن المستويات المرتفعة من غاز (أكسيد النتروز) Nitrous Oxide (N_2O) في البيئة، نتيجة الاحتراق المتزايد والاستعمال المتزايد للمخصبات (الأسمدة) الغنية بالنتروجين، أثارت اهتمامات مماثلة. وقد ضعفت هذه الاهتمامات عام 1974، حين قام (م.ج. مولينا) Mario J. Molina، و(ف.ش. رولاند) F. Sherwood Rowland من جامعة كاليفورنيا في إيرفين بدقّ جرس الإنذار للتنبيه إلى خطر الاستعمال المتعاظم لما يُعرف باسم مركبات (كلوروفلوريد الكربون) Chlorofluorocarbons، ومنذ ذلك الحين هَيمنَ ما يُسمى بمشكلة فلوريد الكربون على قطاع واسع من البحوث في هذا الميدان.

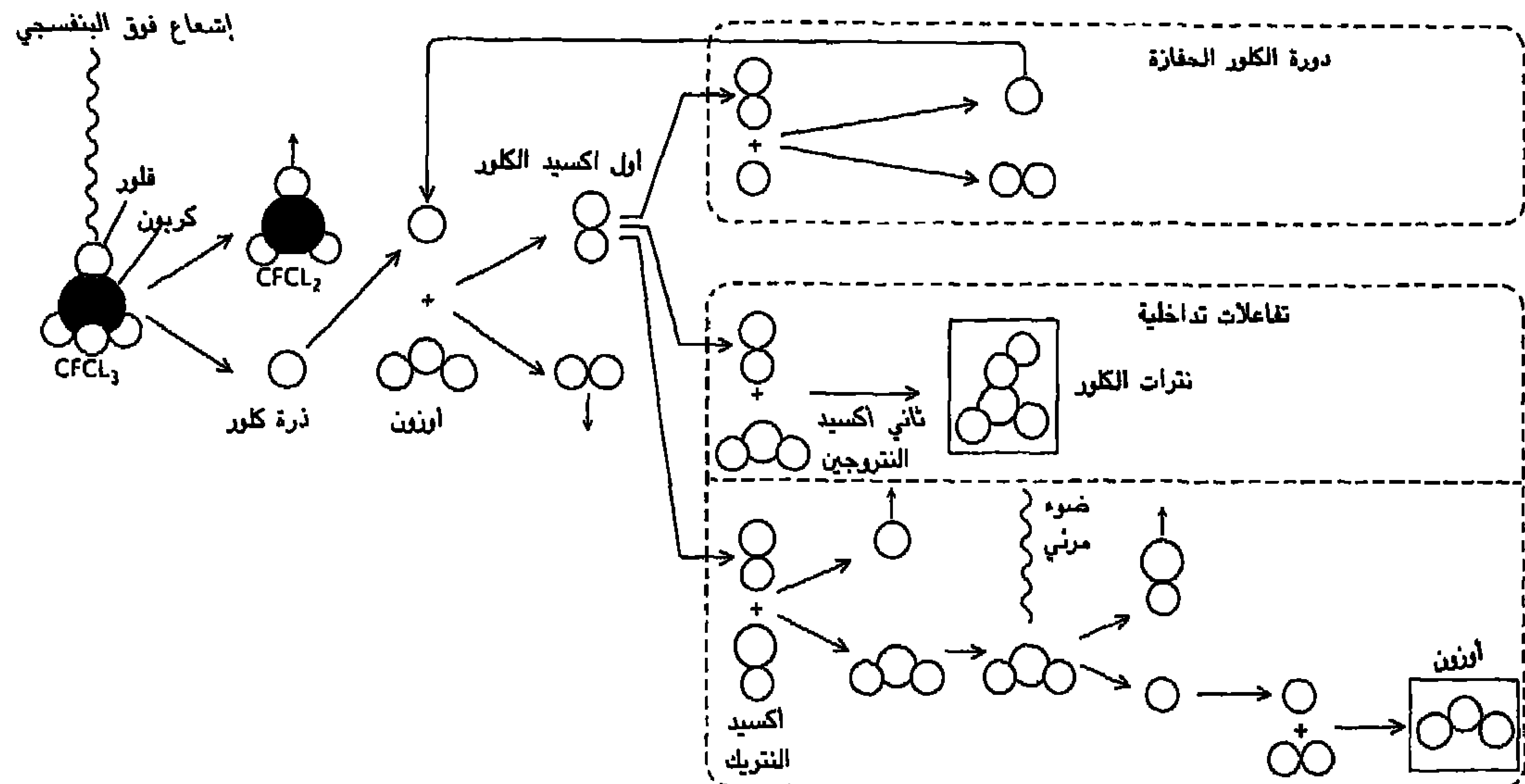
تتألف مركبات كلوروفلوريد الكربون، كما يوحي اسمها من كلور وفلور وكربون. وعندما استخدمت هذه الغازات أول مرة منذ زهاء 60 عاماً، فإنها كانت تستعمل كمبردات في الثلاجات وأجهزة تكييف الهواء، و(كدافعات) Propellants لمرذاذات الغازات أو الأبخرة المضغوطة في وعاء (كما هي الحال في بعض زجاجات العطور)، وكوسطاء لإنتاج (الرغوة) Foam، وكمنظفات للقطع الإلكترونية. وهذه المركبات، التي مازال لها تطبيقات واسعة، كانت تعد في وقت من الأوقات مواد كيميائية صناعية مثالية فعلاً، إذ أنها ثابتة التركيب على نحو كبير، ولا تتفاعل بسرعة (خاملة) ومن ثم فهي غير سامة. ومن دواعي السخرية أن خمول هذه المركبات هو الذي يجعلها مزعجة بالنسبة للأوزون في طبقة الستراتوسفير.



يمتص الاوزون في الجو مقادير ضخمة من الإشعاع فوق البنفسجي ، الذي لولا الاوزون لوصل الى الارض يتولد الغاز (a) حين يقع فوتون الاشعاع فوق البنفسجي ذي الطاقة العالية على جزيء اكسجين (O_2)، فتنفلت ذرّتاه (O) لتتّحدا بجزيئات الاكسجين المجاورة. والاوزون (O_3)، المكون على هذا النحو ، يتم تحطيمه تكرارًا بفوتونات الضوء فوق البنفسجي او الضوء المرئي، ويعاد تكوينه بسرعة، ويصبح مهيًا لامتصاص مزيد من الضوء (b). و«يموت» الاوزون (c) عندما تصطدم به ذرة اكسجين مكونا جزيئين من الاكسجين.



يُظنُّ ان مركبات كلوروفلوريد الكربون، التي هي مواد كيميائية تركيبية (صنعية)، تسهم اسهاما فعالا في الثقب الاوزوني. فبعد إطلاقها في طبقة التروبوسفير، حيث تظل خاملة، ترتفع هذه المركبات في النهاية الى طبقة الستراتوسفير العليا فوق المنطقة التي تبلغ فيها تركيزات الاوزون (الملوَّنة) ذروتها. ويكون الإشعاع فوق البنفسجي هناك شديدا لدرجة تكفي لتحطيم الجزيئات، محررًا ذرات الكلور كي تقوم بمهاجمة الاوزون وتنتهي الاثار التحطيمية للكلور عند اتحاد الذرات بمواد اخرى كي تكوِّن «مستودعات» من الكلور المستقر. وقد تتفكّك هذه الجزيئات بوجود الحرارة او الضوء، معيدة الكلور الى الستراتوسفير، إلا ان بعضها يستقر في التروبوسفير حيث تزيلها من الجو عمليات متنوعة.



تتضمن كيمياء الكلور عمليات تعزز تحطيم الاوزون، وعمليات تعوقه وبوسع ذرة الكلور تحطيم الاوزون بالتحفيز (اليسار والاعلى)، دون ان تستهلك الذرة نفسها. فهي «تسرق» اولا ذرة اكسجين من الاوزون مكونة اول اكسيد الكلور (ClO) وجزيء اكسجيني مستقر. ولدى اصطدام اول أكسيد الكلور بذرة أكسجين أخرى تتحد ذرتا الاكسجين بسرعة، محرِّرة ذرة الكلور كي تزيل جزيء أوزون اخر وتتدخل عمليات اخرى في الدورة الحفازة. وعلى سبيل المثال، يمكن أن يرتبط ثاني اكسيد النتروجين (NO_2) باوّل اكسيد الكلور ليكوِّنا مستودعا للكلور (الوسط)، وحين يكون الكلور مقيدًا بهذه الطريقة، فلا يمكنه التفاعل مع الاوزون. وهناك مصدر آخر للتداخل (الاسفل) هو اكسيد النتريك (NO) الذي ياخذ ذرة الاكسجين من اول اكسيد الكلور، ويمتص الضوء المرئي، ويعيد توليد الاوزون. وتوحي التعليلات الكيميائية للثقب الاوزوني ان الظروف المناخية الفريدة في القطب الجنوبي تقلّل مثل هذه التداخلات الى الحد الادنى، تاركة المجال للدورة الحفازة أن تستمر بفعالية.

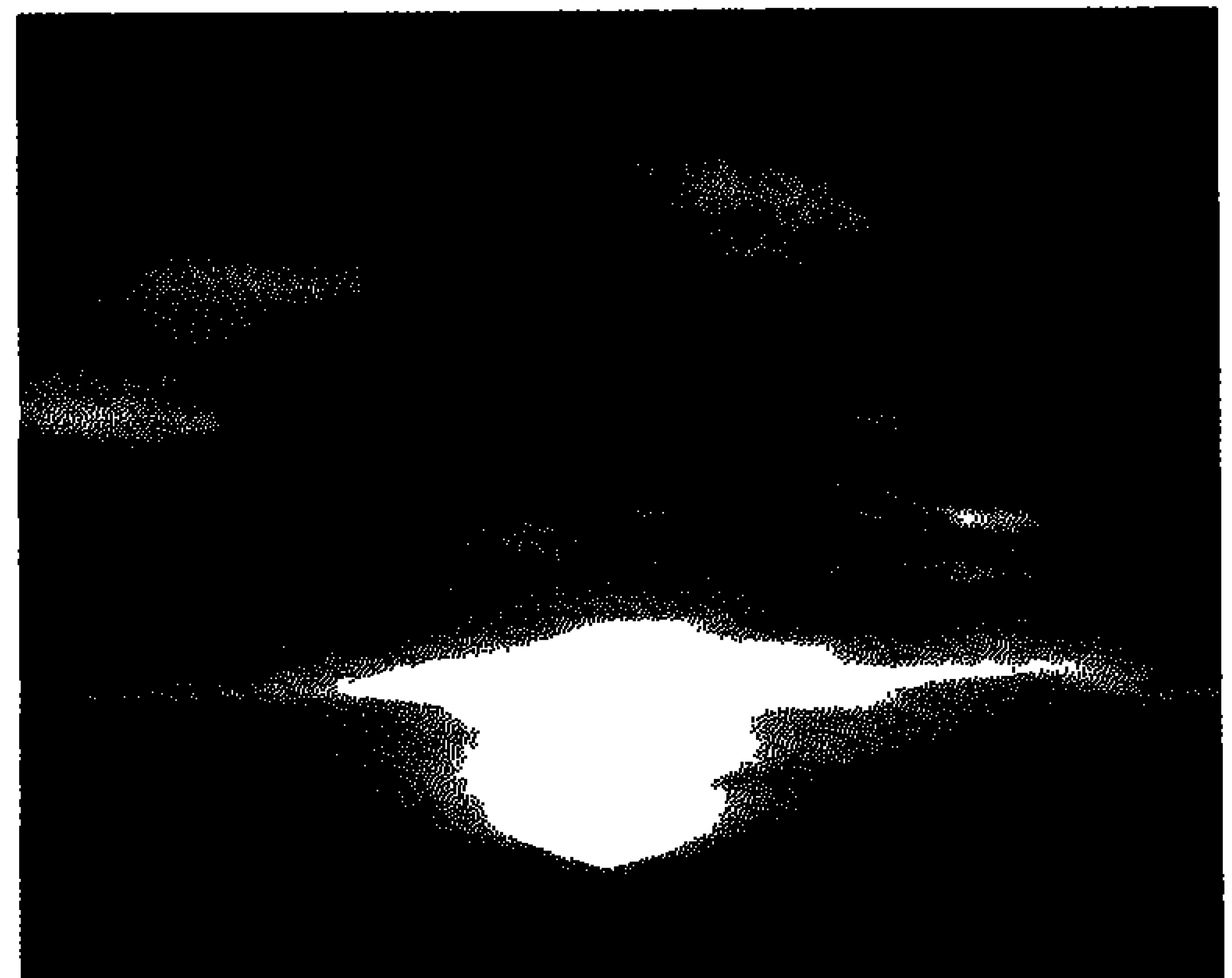
إن الغازات الخاملة لا تتخلل بسهولة إلى مركبات أخرى أبسط منها تحوي عدداً أقل من ذرات الكربون في طبقة التروبوسفير، وهي الجزء من الجو الممتد من سطح الأرض إلى ارتفاع يساوي نحو 10 كيلومترات. ونتيجة لذلك، فإن مثل هذه المواد تجد في نهاية المطاف طريقها إلى طبقة الستراتوسفير التي تمتد إلى قرابة 50 كيلومتراً، ولدى إرتفاع الجزيئات أكثر من زهاء 25 كيلومتراً، حيث يبلغ تركيز الأوزون ذروته تقريباً، فإنها تصبح عرضة للضوء فوق البنفسجي الشديد الذي يمتصه الأوزون على ارتفاعات أخفض. وبمقدور هذا الإشعاع عادة أن يحطم الجزيئات المستقرة (مثل جزيئات مركبات كلوروفلوريد الكربون) محولاً إياها إلى أشكال أكثر فعالية (مثل ذرات الكلور).

بينت الدراسات المختبرية أن الكلور يحطم الأوزون بسرعة. ولما كانت ملايين من أطنان مركبات كلوروفلوريد الكربون تُطلق في البيئة المحيطة بنا، فإن العديد من الباحثين يرون أن الإطلاق المتواصل لهذه المركبات سيؤدي في نهاية المطاف إلى تراكمها في الستراتوسفير بكثافة قادرة على إحداث تآكل خطير في الدرع الأوزوني. وفضلاً عن ذلك، فإنه يُحتمل أن تستمر هذه العملية التحطيمية في القرن القادم أيضاً ــ حتى لو توقف إطلاق كلوروفلوريد الكربون حالاً، لأن المواد الكيميائية تبقى في الجو طوال عقود من الزمن، ويقول الباحثون إن النوعين الرئيسيين، وهما المركب رقم 11($CFCl_3$) والمركب رقم 12(CF_2Cl_2) يدومان نحو 75 عاماً، على التوالي.

واستناداً إلى مثل هذه الحجج، فقد حظرت الولايات المتحدة عام 1978 استعمال مركبات كلوروفلوريد الكربون في المنتجات التي تُسوّق على شكل خُلالات هوائية، مثل بعض (مزيلات الروائح) Deodorants و(رشاشات الشعر) Hair Sprays. بيد أن الجهود التي بذلت للتحكم في استعمالات أخرى أحرزت نجاحاً محدوداً، ويرجع ذلك جزئياً إلى المعرفة المتزايدة عن تعقيد كيمياء الستراتوسفير. وعلى سبيل المثال، فعلى الرغم من أنه كان معروفاً أن مواد مثل أكاسيد النتروجين والهيدروجين يمكنها ذاتها تحطيم الأوزون، فقد أظهرت الحسابات الحديثة أن باستطاعة أكاسيد النتروجين التفاعل مع الكلور بطرق يمكنها في الواقع أن تعطل مقدرة الكلور على مهاجمة الأوزون.

ثم جاء الإعلان البريطاني الذي تضمن تقريراً يفيد أن مستويات أكتوبر/ تشرين أول عام 1986 من الأوزون فوق محطة البحوث البريطانية في القطب الجنوبي انخفضت من قيمتها الطبيعية التي تقارب 300 وحدة دوبسون في أوائل السبعينيات إلى نحو 180 وحدة عام 1984. وقد أحيا هذا الاكتشاف اهتمام الناس بالطبقة الأوزونية الجوية التي تحيط بالأرض. وفي نفس الوقت، وبسبب الزيادة في معدلات إطلاق مركبات كلوروفلوريد الكربون، فإن المخططين الدوليين للبيئة كانوا منهمكين في المناقشات المحتدمة حول فرض رقابات دولية على هذه المركبات. وقد أسفرت هذه المناقشات عن توقيع 23 دولة (من ضمنها الولايات المتحدة) في سبتمبر/ أيلول الماضي اتفاقاً يقضي بتخفيض استهلاك هذه المواد. وهذه الاتفاقية، التي يجب إقرارها من قبل 11 دولة على الأقل قبل أن تصبح قانونية في بداية عام 1989، تتطلب من الدول المتقدمة أن تجمد استهلاك هذه المواد عند مستويات عام 1986 بحلول منتصف عام 1990 وأن تخفض استعمالها إلى النصف بحلول عام 1999.

إن الظاهرة الكيميائية الكامنة في أساس نظرية كلوروفلوريد الكربون تتجلى في مقدرة كميات قليلة من الكلور على تحطيم كميات كبيرة من الأوزون. ويتم تكوين جزيء الأوزون (O_3) عندما يقع الضوء فوق البنفسجي على جزيء أكسجين (O_2)، إذ يشطر الفوتون هذا الجزيء إلى ذرتي أكسجين عاليتي الفعالية (O). وتتحد هذه الذرات الفعالة بسرعة مع جزيئات أكسجين سليمة فيتكون الأوزون (O_3). ويمتص الغاز الناتج الضوء فوق البنفسجي بسرعة متفككاً إلى مركبتيه (O_2 و O)؛ ومن ثم تنضم ذرة الأكسجين الطليقة إلى جزيء أكسجين آخر، معيدة بذلك تشكل الأوزون مرة ثانية. ويواصل الغاز التفكك وإعادة التشكل عدة مرات بهذه الطريقة إلى أن يصطدم أخيراً بذرة أكسجين طليقة مكوناً جزيئين أكسجينيين مستقرين (انظر الشكل في الصفحة 821). وعند تــوافر ظـــروف ثابتـــة، تكـــون النتيجـــة الصافية لهذه العمليات استقرار الأوزون في حالة ديناميكية، حيث تساوي سرعة تكونه سرعة زواله.



تتكون الغيوم الستراتوسفيرية القطبية فوق القارة القطبية الجنوبية عندما تتسبب درجات حرارة الشتاء القارس البرودة في تكثيف وتجميد بخار الماء، وربما غازات أخرى، مثل حمض النتريك. وقد رأى بعض العلماء أن الغيوم قد تسهل تحطيم مستودعات الكلور، مطلقة الكلور ليحطم الأوزون عند عودة الشمس في فصل الربيع.

إن الكلور يغير هذا التوازن ويخفض كمية الأوزون في طبقة الستراتوسفير بتسريع تحوله إلى جزيئي أكسجين. والأهم من ذلك أن الكلور (مثله مثل أكاسيد النتروجين والهيدروجين) يقوم بدور (المحفز Catalyst)، أي أنه لا يتغير خلال العملية. ومن ثم، فإن كل ذرة كلور يمكنها تحطيم نحو 100000 من جزيئات الأوزون قبل أن تفقد فاعليتها، أو تعود في النهاية إلى طبقة التروبوسفير، حيث يتسبب الترسب وعمليات أخرى في إبعادها عن الجو.

إن الكيمياء التي يعتقد بأنها وراء عملية التحطيم هذه واضحة المعالم إلى حد ما. فعندما تصطدم ذرة الكلور (Cl) بجزيء الأوزون، يسلب الكلور ذرة الأكسجين الثالثة في الأوزون، مكوناً جذر أول أكسيد الكلور (ClO) وجزيء الأكسجين. و(الجذور) Radicals، التي هي جزيئات ذات عدد فردي من الإلكترونات، هي متفاعلة تماماً. وعند التقاء أول أكسيد الكلور بذرة الأكسجين الطليقة ــ وهي خطوة هامة في دورة التحفيز ــ يغدو الأكسجين في أول أكسيد الكلور مجذوباً بقوة إلى هذه الذرة الطليقة، وينفصل مكوناً جزيء أكسجين جديداً. والكلور «المهجور»، أي الناتج عن هذه العملية، تصبح لديه الحرية في أن يشرع من جديد بتحطيم الأوزون.

إن دورة الكلور الحفازة لا تتم عادة دون قيود ومداخلات. فهناك نوعان رئيسيان من التفاعلات يعتقد أنهما يتدخلان في عملية تحطيم الأوزون، على الأقل عند الارتفاعات المتوسطة. ففي إحدى الحالات يتفاعل أول أكسيد الكلور مع أكسيد النتريك (NO)، وتنتقل ذرة الأكسجين في أول أكسيد الكلور إلى أكسيد النتريك منتجة ذرة كلور طليقة وثاني أكسيد النتروجين (NO_2). وعندما يمتص ثاني أكسيد النتروجين الضوء المرئي، فإنه يحرر ذرة أكسجين تكون عند ذلك جاهزة لأن تعيد توليد الأوزون (انظر الشكل في الصفحة 821). وتكون النتيجة الصافية عدم حدوث تغير في مستوى الأوزون.

وفي حالة ثانية أكثر أهمية يؤدي اتحاد ذرة الكلور أو جذر أول أكسيد الكلور بجزيء آخر إلى نتاج مستقر يقوم مؤقتاً بدور «مستودع» للكلور؛ وعند ارتباط الكلور على هذا النحو (كما هي الحال في معظم الوقت في الجو العادي)، فإنه لا يتيسر له مهاجمة الأوزون. وثمة مستودعان مهمان هما نترات الكلور ($ClONO_2$)، المكونة من اتحاد أول أكسيد الكلور بثاني أكسيد النتروجين (NO_2)، وحمض الهيدروكلوريك (HCl) المكون من تفاعل ذرة الكلور مع الميثان (CH_4). وفي نهاية المطاف، فإن هذين المستودعين يمتصان فوتوناً، أو يتفاعلان مع مواد كيميائية أخرى، ويتفككان فيتحرر الكلور ليستأنف تحفيزه في تحطيم الأوزون.

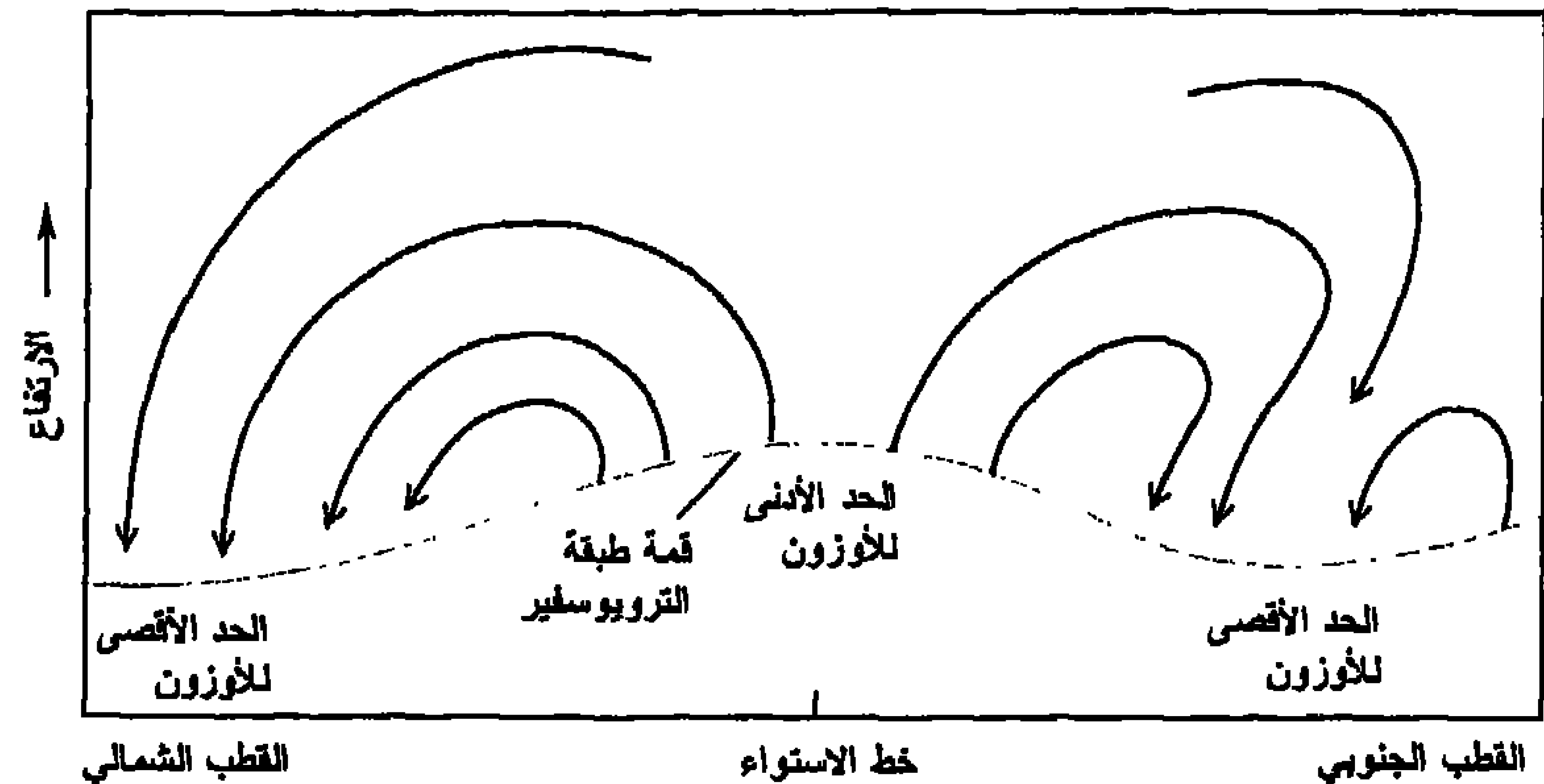
إن وجود هذه التفاعلات التداخلية قاد واضعي نماذج الحواسيب على الدوام إلى الاستنتاج بأنه لابد وأن يكون لمركبات كلوروفلوريد الكربون حتى الآن أثر ضئيل في طبقة الأوزون المحيطة بالأرض. والاكتشاف بأن مستويات الأوزون الربيعية في القطب الجنوبي انخفضت بما يزيد عن 40 في المئة توحي بأنه إذا كان الكلور الآتي من مركبات كلوروفلوريد الكربون سبباً في ذلك، فإن التفاعلات التداخلية العادية تتضاءل بطريقة ما خلال ربيع القارة القطبية الجنوبية. والسؤال الذي يُطرح هنا هو كيف يتم ذلك؟

لقد حدد أنصار نظرية مركبات كلوروفلوريد الكربون في تعليل الثقب الأوزوني عمليات عديدة بمقدورها التقليل إلى حد كبير من تأثيرات هذه التداخلات. وعلى سبيل المثال، فإن إزالة أكاسيد النتروجين من الستراتوسفير من شأنها أن تسهل تحطيم الأوزون. فإذا لم تكن هذه الأكاسيد متوافرة، فلا يمكنها الاتحاد بالكلور لتكوين مستودع نترات الكلور. وبالإضافة إلى ذلك، فقد تُغير عملية ما مستودعات الكلور فتجعلها تطلق كلوراً نشطاً، على شكل ذرات فرادية، أو على شكل أول أكسيد الكلور، وهذا سيحطم الأوزون.

ويشتبه عديد من الباحثين في أن الغيوم الستراتوسفيرية القطبية تسهم في مثل هذه العمليات. فهذه الغيوم ذات الارتفاع العالي، التي تنتشر في منطقة القارة القطبية الجنوبية على نحو أوسع من انتشارها في القطب الشمالي، تتشكل في فصل الشتاء، عندما يؤدي غياب نور الشمس وانعزال منطقة القارة القطبية الجنوبية إلى درجات حرارة ستراتوسفيرية، غالباً ما تنخفض دون 80- درجة سيلزية.

ويمكننا أن ندرك أن مركبات النتروجين تتكثف وتتجمد أثناء فصل الشتاء، وتغدو مقيدة إلى جسيمات الغيوم، وتصبح عند ذلك غير متوافرة للتفاعل مع الكلور. وفي الوقت ذاته، فقد تسهل الجسيمات الغيمية تحويل مستودعات الكلور إلى كلور نشط. ويمكن لبعض التفاعلات الكيميائية التي تتم ببطء في محيط غازي صرف أن تحدث بصورة أسرع على نحو ملحوظ فوق سطح الجسيمات. وفي ظلام الشتاء القطبي، فإن العديد من العمليات الكيميائية تتوقف في واقع الأمر تماماً. على أية حال، فمن الممكن لجسيمات غيوم القطب الستراتوسفيرية أن تلتقط وتعدل مخزون الكلور الرئيسي تعديلاً بطيئاً، وبذلك تهيئ الإفلات السريع لأول أكسيد الكلور حين تبدأ الشمس بالسطوع. ومن سوء الحظ، فما يزال تركيب الجسيمات الغيمية والتفاعلات الدقيقة التي تحدث على سطوحها أمراً مجهولاً حتى الآن.

ويتعين على نظرية كلوروفلوريد الكربون في تعليل الثقب الأوزوني أن لا تقتصر على شرح الكيفية التي تتم بها إعاقة التداخلات «العادية» في دورة الكلور الحفازة (الوسيطية) خلال ربيع القارّة القطبية الجنوبية، بل يتحتم على هذه النظرية أيضاً شرح كيفية التغلب على ظاهرة طبيعية قطبية فريدة. إن الشمس تبقى واطئةً - أي قريبةً من الأفق - إلى حد ما في الربيع القطبي، وبناءً على ذلك فهناك انخفاضٌ في تحطم جزيئات الأوزون بواسطة الإشعاع، مما يترتب عليه انخفاض في كمية ذرّات الأكسجين الطليقة التي تسهم في دورة الكلور الحفازة.



في الدوران الستراتوسفيري، الممثل في هذا الشكل بأسلوب تخطيطي كامل، ينتقل الهواء من خط الاستواء باتجاه القطبين حاملاً معه الأوزون. ينجم عن ذلك أن مستويات الأوزون حول الكرة الأرضية لا تبلغ ذروتها عند خط الاستواء، حيث يتم إنتاج معظم الأوزون، بل تبلغها قرب القطب الشمالي وقرب درجة عرض تساوي 60 جنوباً تقريباً. (ولا يرتحل الأوزون جنوباً أبعد من ذلك خلال معظم العام، إذ أن الدوران الجوي يواجه مقاومة عند درجة العرض تلك). إن حقيقة تأثر مستويات الأوزون بالدوران الجوي زادت من الاحتمال بأن يكون الثقب الأوزوني ناجماً جزئياً عن تغير في جريان الهواء في نصف الكرة الجنوبي.

إن وجود قدر معقول من البروم (Br) في الغيوم الستراتوسفيرية القطبية قد يساعد في التعويض عن هذا النقص في ذرات الأكسجين الطليقة. وهذه المادة الكيميائية، أي البروم، التي تُطلق إلى الجو من مركب «بروم المثيل» methyl bromide الموجود عادة في الطبيعة، ومن مصادر الدخان والغازات وبعض مطفئات الحريق، يُمكن أن تتفاعل مع الأوزون مكوّنةً جذر أوّل أكسيد البروم (BrO) وجزيء الأكسجين، ويمكن لأول أكسيد البروم أن يتفاعل بدوره مع أول أكسيد الكلور كي يُكوّن جزيء أكسجين آخر يطلق ذرات حرة من البروم. (والنتيجة الصافية هي تحويل الأوزون إلى أكسجين). وباستطاعة مثل دورة الكلور - البروم الحفازة هذه أن تعمل بسلاسة، حتى عندما تكون ذرات الأكسجين الطليقة نادرة نسبياً في المنطقة المحيطة. والبروم في حد ذاته فعال أيضاً في تحطيم الأوزون، إذ أنه يحرض على سلسلة من التفاعلات شبيهةً بتلك التي يولّدها الكلور، لكنها لا تتطلب ذرات أكسجينية طليقة.

وعلى الرغم من أن العديد من الأسئلة ما انفكّت تُطرح حول الكيمياء التي يمكنها أن تؤدي إلى تحطيم الأوزون في طبقة الستراتوسفير القطبية الجنوبية، فإن المعطيات التي جُمعت من دراسة رئيسية أجريت عام 1986 في موقع McMurdo Sound في القارة القطبية الجنوبية، والنتائج الأولية من تجربة فحص أوزون القارة القطبية الجنوبية بالأجهزة المحمولة جواً عام 1987 قد أعطت بعض الدعم لنظرية كلوروفلوريد الكربون، وعلى سبيل المثال، فإن مقادير أول أكسيد الكلور في الثقب الأوزوني خلال فصل الربيع ترتفع بالمقارنة مع مستوياته في درجات العرض المتوسطة. وأكثر من ذلك، فقد وُجد، انسجاماً مع ما تم التنبؤ به مسبقاً، إنّ مستويات أكاسيد النتروجين في الثقب الأوزوني تنخفض انخفاضاً حاداً قياساً مع المستويات الموجودة في درجات العرض المتوسطة.

وتقدم المعطيات أيضاً دليلاً يتفق مع الرأي القائل بأن مستودعي ذرات الكلور وحمض الهيدروكلوريك تغيرهما الغيوم فمستويات الحالة الغازية لكل من المستودعين تكون منخفضة في بواكير فصل الربيع في القطب الجنوبي (عندما يكون الثقب آخذاً في التشكل)، لكنّ هذه المستويات ترتفع بعدئذ. وتوحي هذه الزيادة بأن قسطاً كبيراً من الغاز كان في البداية مخزوناً بشكل يصعب اكتشافه، كأن يكون على شكل جسيمات غيمية. أما وجود وظيفة مهمة للبروم أيضاً، كما تقول النظرية، فأمرٌ غير واضح. وتشير المكتشفات الأولية إلى أن تركيزه قد لا يكون عالياً على نحو استثنائي في طبقة الستراتوسفير فوق القارة القطبية الجنوبية.

إنّ دعم التفسير الكيميائي للثقب الأوزوني لا يُلغي إمكانية أن تكون العمليات الطبيعية، مثل حدوث تغير في الديناميكية الجوية، مهمةً أيضاً. فالعمليات التحريكية لا تحطم الأوزون، إنّما تقوم بكلّ بساطة بإعادة توزيعه.

إن الاشتباه في أن التغير في الديناميكية الجوية قد يلعب دوراً مؤثراً ينبع من حقيقة أنّ الجو ليس ساكناً، بل هو مائع ثلاثي الأبعاد يتحرك على الدوام، لا يتغير فيه مكان الأوزون وكميته فحسب، بل أيضاً مكان وكميات جميع المواد الكيميائية التي تؤثر فيه. فلو كانت مستويات الأوزون، التي تتأرجح دائماً إلى درجة معينة، تتأثر بالشمس دون غيرها، لتوقّعنا أن نجد أعلى المستويات حيث تكون الشمس أقوى ما يمكن، وهذا يتم عند الارتفاعات العالية جداً ودرجات العرض المنخفضة جداً. وفي الواقع فإنّ مستويات الأوزون لا تبلغ ذروتها في أعالي طبقة الستراتوسفير، بل في وسطها. أضف إلى ذلك أنّ أكبر الكميات من الأوزون لا توجد فوق خط الاستواء، حيث تبلغ مستويات الأوزون النموذجية نحو 260 وحدة دوبسون فقط، بل توجد قرب القطبين.

ينشأ هذا التوزع من أن طبقة الستراتوسفير تنحو إلى الانتقال من الارتفاعات العالية في المنطقة الاستوائية صوب الارتفاعات الدنيا في المناطق القطبية، حاملةً معها الأوزون المصنوع حديثاً. وفي نصف الكرة الشمالي يكون دوران الهواء في الستراتوسفير على امتداد الطريق إلى القطب الشمالي، حيث يصل متوسط

مستوى الأوزون إلى قرابة 450 وحدة دوبسون في أواخر الشتاء أو أوائل الربيع. أمّا في نصف الكرة الجنوبي فإن دوران الهواء لا يتعدى درجة عرض 60 جنوباً معظم السنة، وتصل مستويات الأوزون هناك ذروتها التي تبلغ 380 وحدة دوبسون. هذا، وإن غرابة الأحوال الجوية في القارة القطبية الجنوبية، كالدوامة القطبية مثلاً، تعوق الهواء الغني بالأوزون عن الحركة جنوباً حتى وقت متأخر في الربيع.

يترتّب جزئياً على مثّل هذه النماذج الدورانية أنّ كمية الأوزون في جو القارة الجنوبية بقيت في الماضي مستقرةً تقريباً حول نحو 300 وحدة دوبسون خلال معظم فصلي الشتاء والربيع، ازدادت هذه الكمية بعد ذلك بسرعة إلى قرابة 400 وحدة دوبسون في الربيع الأخير، وذلك عندما تبدّدت الدوامة القطبية، مفسحة بذلك المجال لدفق سريع من الهواء آت من درجات عرض أصغر. أما الآن، فإن كمية الأوزون مستقرة تقريباً في غضون فصل الشتاء، لكنّها تهبط بسرعة في فصل الربيع إلى أقلّ من 200 وحدة دوبسون.

في بادئ الأمر كان التفسير الديناميكي يعزو الهبوط الربيعي في كمية الأوزون إلى «الهباء الجوي» aerosols أو الجسيمات الدقيقة التي صدرت عن الانفجار البركاني El Chichon في المكسيك عام 1982 - التي ربما تكون قد امتصت الإشعاع الشمسي مما يسخن الستراتوسفير ويسبب حركة شبه ناقورية في الهواء الغني بالأوزون إلى أعلى هذه المنطقة وإلى جوانبها. إن جزءاً كبيراً من هذا الغبار البركاني قد اختفى الآن، وهذا يعني أن مستويات الأوزون يجب أن تكون قد استعادت قيمتها. وترى نظرية أخرى أن الاندفاع العلوي يحدث لأن دوران الهواء الغني بالأوزون نحو القطب الجنوبي من مناطق خطوط العرض الدافئة أخذ يضعف. وهذا بدوره يسبب دوراناً عكسياً ينقل الهواء القطبي الغنيّ بالأوزون نحو الأعلى من المنطقة الدنيا في طبقة الستراتوسفير، وباتجاه خط الاستواء. وهذا الهواء يحل محله هواء فقير آت من طبقة التروبوسفير في الأسفل.

إنّ الشواهد التي تؤيد الآلية الديناميكية قد تأتي من تحليل درجات الحرارة. فإذا لم يكن باستطاعة الدوران الربيعي الوصول إلى المنطقة القطبية، فإن المرء يتوقع أن يجد انخفاضاً في كل من الحرارة والأوزون هناك. ولم يتم اكتشاف تغيرات ذات بال في درجة حرارة ستراتوسفير القارة القطبية الجنوبية في شهري أغسطس/ آب وسبتمبر/ أيلول، عندما يكون الثقب في مرحلة التشكل، لكن الباحثين وجدوا قيماً أدنى لمتوسط درجات الحرارة في شهر أكتوبر/ تشرين أول، الشيء الذي يسلط الضوء على التأخر في الدفق الربيعي للهواء الدافئ إلى المنطقة.

وكما يحدث غالباً في العلم، فإنّ معنى تدني درجة الحرارة في أكتوبر/ تشرين أول يفتح المجال أمام تأويلات أخرى. وعلى سبيل المثال، فقد ينجم هذا التدني عن الانخفاضات الناتجة عن العمليات الكيميائية في أوزون الستراتوسفير وليس عن التغيرات في أنماط حركات الهواء في الجو. ولما كان الأوزون يمتص ضوء الشمس، فإن تحطمه في الربيع قد يُفضي إلى امتصاص قدر أقل من المعتاد من ضوء الشمس، مما يؤدي بدوره إلى ستراتوسفير أبرد.

ثمة دليل فيه بعض الإبهام على أن نمطاً معيناً من العمليات الديناميكية يسهم في إحداث الثقب الأوزوني. فقد روى المشرفون على تجربة فحص أوزون القارة القطبية الجنوبية بالأجهزة المحمولة جواً عام 1987 أنه في أحد الأيام، وهو الخامس من سبتمبر/ أيلول، هبطت مستويات الأوزون نحو 10 في المئة فوق منطقة مساحتها زهاء ثلاثة ملايين كيلومتر مربع. وقد استنتج الباحثون أن العمليات الكيميائية لا تقدم تعليلاً محتملاً لمثل هذا الهبوط السريع والمثير، لكن حركة الهواء توفر التعليل المعنوي. ويبدو من المحتمل في هذه الحالة أن الهواء الفقير بالأوزون تحرك إلى المنطقة مؤقتاً، ربما من الجزء الأدنى من الستراتوسفير. ومن ناحية أخرى، فحين قاس الباحثون تركيزات الغازات التي بفحصها تُعرف حركة الهواء، فإنهم لم يجدوا دليلاً لاندفاع علوي مستديم على نطاق واسع في طبقة الستراتوسفير.

وتُختبر النظريات الديناميكية والكيميائية أيضاً في تفسيراتها للغز علمي آخر مرتبط بموضوعنا، يتلخص في الاكتشاف بأن الكميات الربيعية من أوزون الستراتوسفير قد هبطت في كامل المنطقة الواقعة جنوب درجة العرض 45 في نصف الكرة الجنوبي. إن الانخفاض في دوران الهواء من درجات العرض المتوسطة لابد أن يكون قد أسهم في هذا الهبوط، بيد أن الكيمياء يمكن أن تلعب دوراً أيضاً. وعلى سبيل المثال، فإن الهواء المستنزف كيميائياً من الدوامة القطبية قد يمتزج بالهواء في المنطقة المحيطة. الأمر الذي ينجم عنه خسارة صافية في الأوزون.

وبأخذ كل المعطيات الحديثة معاً، يتعزز الشك المتنامي في أن مركبات كلوروفلوريد الكربون تسهم إسهاماً هاماً في الثقب الأوزوني. وتشير النتائج أيضاً إلى أن هذه الظاهرة تتأثر بالأحوال الجوية الفريدة التي تسود منطقة الثقب (وهي الدوامة القطبية، ودرجات الحرارة الستراتوسفيرية القارسة البرودة، والغيوم الستراتوسفيرية القطبية)، كما يحتمل أن تتأثر أيضاً بتغير في أنماط جريان الهواء في نصف الكرة الجنوبي. ما الذي يعنيه كل هذا فيما يتعلق بالخطر المحتمل الذي يحيق بالدرع الأوزوني الواقي للكرة الأرضية؟

توحي المعطيات أن الفقدان الموسمي الاستثنائي في أوزون القطب الجنوبي قد يكون في الواقع خاصة محلية لن تعيد نفسها في المناخات الأدفأ، إلا أنّ هذا التقييم غير قطعي. إن هناك أمراً واحداً واضحاً، ألا وهو أن مركبات كلوروفلوريد الكربون قادرة على تغيير مستويات الأوزون في الجو.

وفضلاً عن ذلك، فإن الكلور الذي تم إدخاله في طبقة الستراتوسفير، سيتفاعل مع الأوزون طوال عقود قادمة.

ولهذه الأسباب، فإن الاتفاق المبرم حديثاً على مراقبة استهلاك مركبات كلوروفلوريد الكربون والحد منها في جميع أنحاء العالم جدير بالثناء. ومن المؤكد أن الجدل سيستمر حول ما إذا كانت أهداف المعاهدة كافية، أو أنها صارمة أكثر مما يلزم، لكن القضية قد تصبح أوضح في القريب العاجل. ويجب أن تكون النتائج الكاملة لتجربة فحص أوزون القارة القطبية الجنوبية بالأجهزة المحمولة جواً في متناول أيدينا بحلول منتصف عام 1988، ثم تجري مراجعة علمية للنتائج في عام 1989، وبعدئذ تتم في عام 1990 مراجعة اتفاقية مونتريال وفق برنامج محدد.

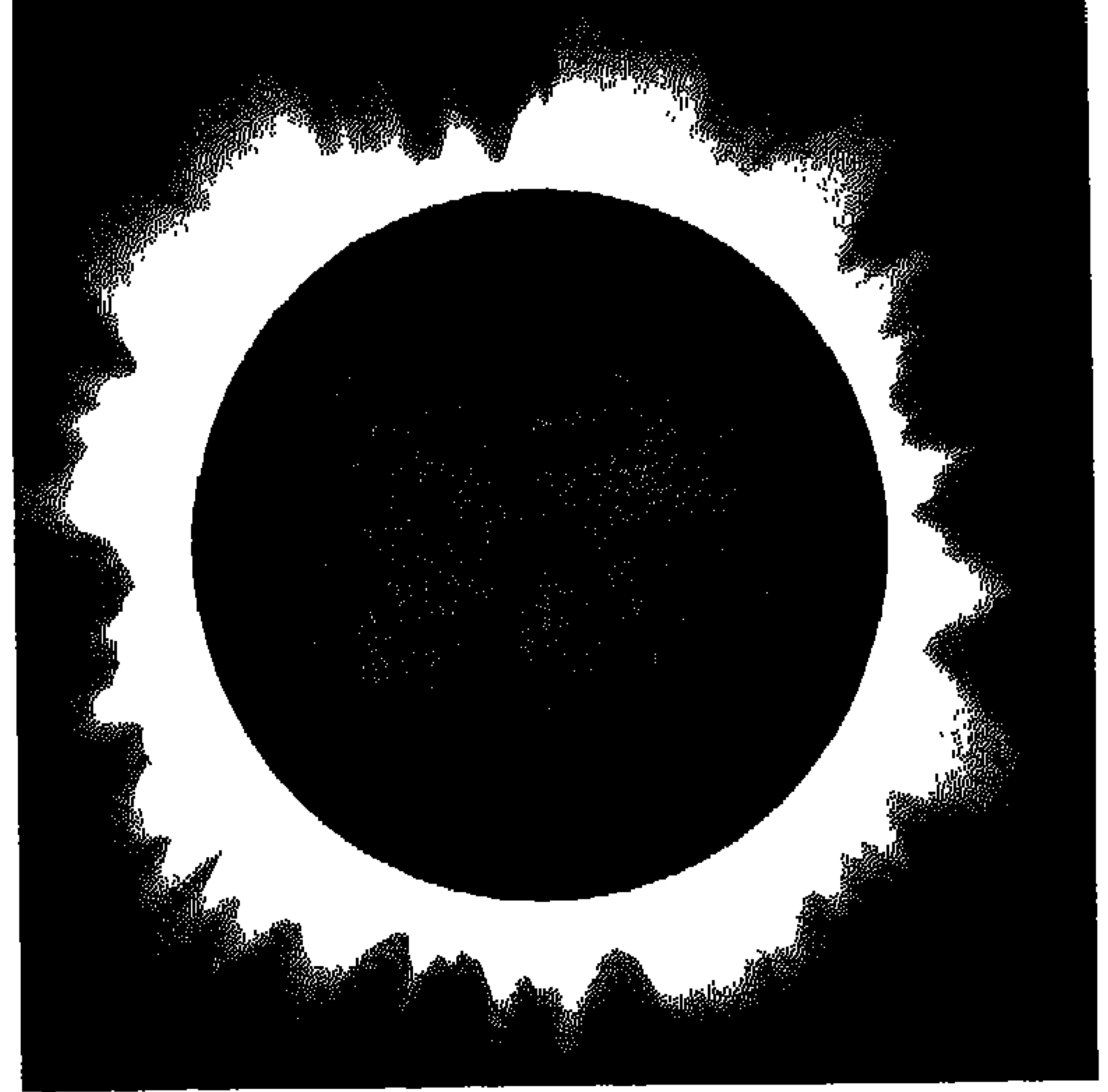
وفي الوقت نفسه، هناك وجه إيجابي للثقب الأوزوني، فضلاً عن دوره في إقناع المجموعة الدولية للتعاون فيما بينها بغية تقليل الخطر الذي يهدد البيئة، فإنه استحث الباحثين على دراسة الكيمياء الجوية والديناميكا الجوية بتفصيل جديد. وقد أدى ذلك الجهد إلى إحداث ثورة في معرفتنا عن كيفية تفاعل الأوزون مع غازات أخرى، وكذلك كيفية تأثر هذه التفاعلات بالظروف الجوية.



طاقة من أجل كوكب الأرض

إن قدرتنا على تلبية احتياجات العالم من الطاقـة، دون أن ندمر الكوكب الذي نعيش عليه، هي مبحثنا فـي هـذا البحـث. ويمكننا فعل الكثير عند وجود الحوافز الصحيحة.

(ج.ر. ديفيز)



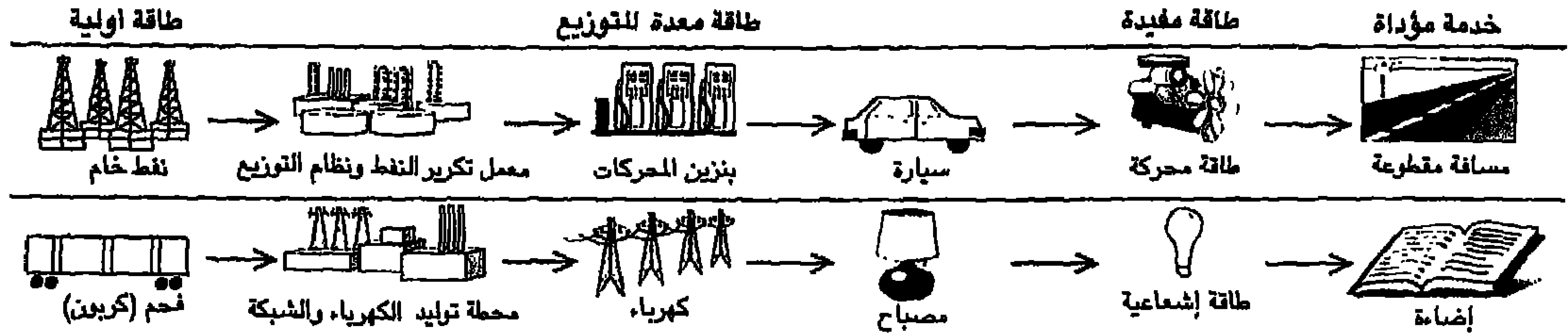
قبل نحو 400000 سنة قبل الميلاد، كانت النار تشتعل في مغارات إنسان بكين. وقد كانت النار تُقدس كإله وتُتخذ أساساً لكثير من الأساطير، وكانت عنصراً أساسياً في الثقافات التي أقيمت عليها المجتمعات المتحضرة. وقد حلت الآلات التي تعمل بالوقود الأحفوري (الحفري) محل القوة العضلية للبشر والحيوان، فأدت بذلك إلى نشأة المجتمعات الصناعية. ولا تستطيع المدن والمنشآت الصناعية وشبكات النقل اليوم أن تعمل دون مدد منتظم من الطاقة.

وحينما كانت أعداد البشر صغيرة، واحتياجات الطاقة محصورة في الطهي والتدفئة، كان من المستطاع استغلال الطاقة دون حدوث خلل خطير في الغلاف الجوي والمائي والصخري. أما الآن، فنظراً لازدياد أعداد السكان، فقد تضخم تأثير استخدام الطاقة، وأصبح قوة مدمرة كامنة، محلياً؛ لأن (الانبعاثات «الإصدارات») Emission تلوث الهواء والماء والتربة، وعالمياً؛ لأن هناك احتمالا بأنها قد تعزز آثار (الدفيئة «الجنّة») Greenhouse. فنحن نجابه معضلة: إذ إن تقانات الطاقة، إذا ما أُحسن استخدامها، تعمل كأداة لتحقيق رفاهية مادية في كل الكوكب، ولكن استمرار التوجهات الحالية يمكن أن يؤدي إلى تدهور البيئة وإلى وجود متدنٍ وغير مؤكد.



الشمس هي المصدر الذي تُستمد منه كل الطاقة تقريباً في كوكب الأرض. فهي القوة الدافعة خلف التركيب (البناء) الضوئي، الذي يحول الطاقة الإشعاعية للشمس إلى طاقة كيميائية، فتجعل حياة النباتات، ومن ثم كل الحياة الحيوانية، أمراً ممكناً. والتركيب الضوئي مسؤول أيضاً عن تكوين الوقود الأحفوري. وتقدم الشمس، على نحو مباشر بدرجة أكبر، الطاقة التي يمكن تصيدها في صورة الطاقة الشمسية والطاقة المائية وطاقة الرياح

إن الاهتمامات بالبيئة ليست جديدة، ولكن فهمنا للكوكب قد تغير بفضل قدرتنا ــ المكتسبة حديثاً ــ على قياس تركيزات أصغر فأصغر من المواد، وتقدير عواقبها على البشر وعلى الأرض كاملة. ولقد توصلنا إلى إدراك أن نمو عدد السكان واحتياجاتهم المتزايدة، يمكن أن تُحدث تحولات في الكوكب بطرائق يمكن مقارنتها بتأثيرات القوى الجيولوجية الطويلة الأمد.



تتحول الطاقة خلال سلسلة من الأحداث . فتوجد الطاقة الأولية على هيئة خام، ولنقل إنها وقود أحفوري يستخرج من مستودع رسوبي. وبعد أن يتم تحويلها، تصبح طاقة معدة للتوزيع، وتصبح متاحة للمستهلك الذي يحولها عندئذ إلى أشكال نافعة، ثم يحولها في نهاية الأمر إلى خدمات طاقية، وهي النهاية المبتغاة.

ومما يعيننا على تفهم مقدار هذا التحدي، تعرُّفنا من أين تأتي الطاقة والغرض الذي تخدمه في حياتنا. وتكاد الطاقة المتاحة أن تكون عائدة كلها إما إلى الشمس (الوقود الأحفوري و«الكتلة الحيوية» Biomass والرياح والإشعاع الواصل لنا)، أو إلى عمليات التطور الكوني التي سبقت نشأة النظام الشمسي (الطاقة النووية). وهناك كميات أصغر من الطاقة ــ وهي أقل أهمية ــ تنتج من حركة القمر (طاقة المد)، ومن قلب الأرض (الطاقة الجيوحرارية).

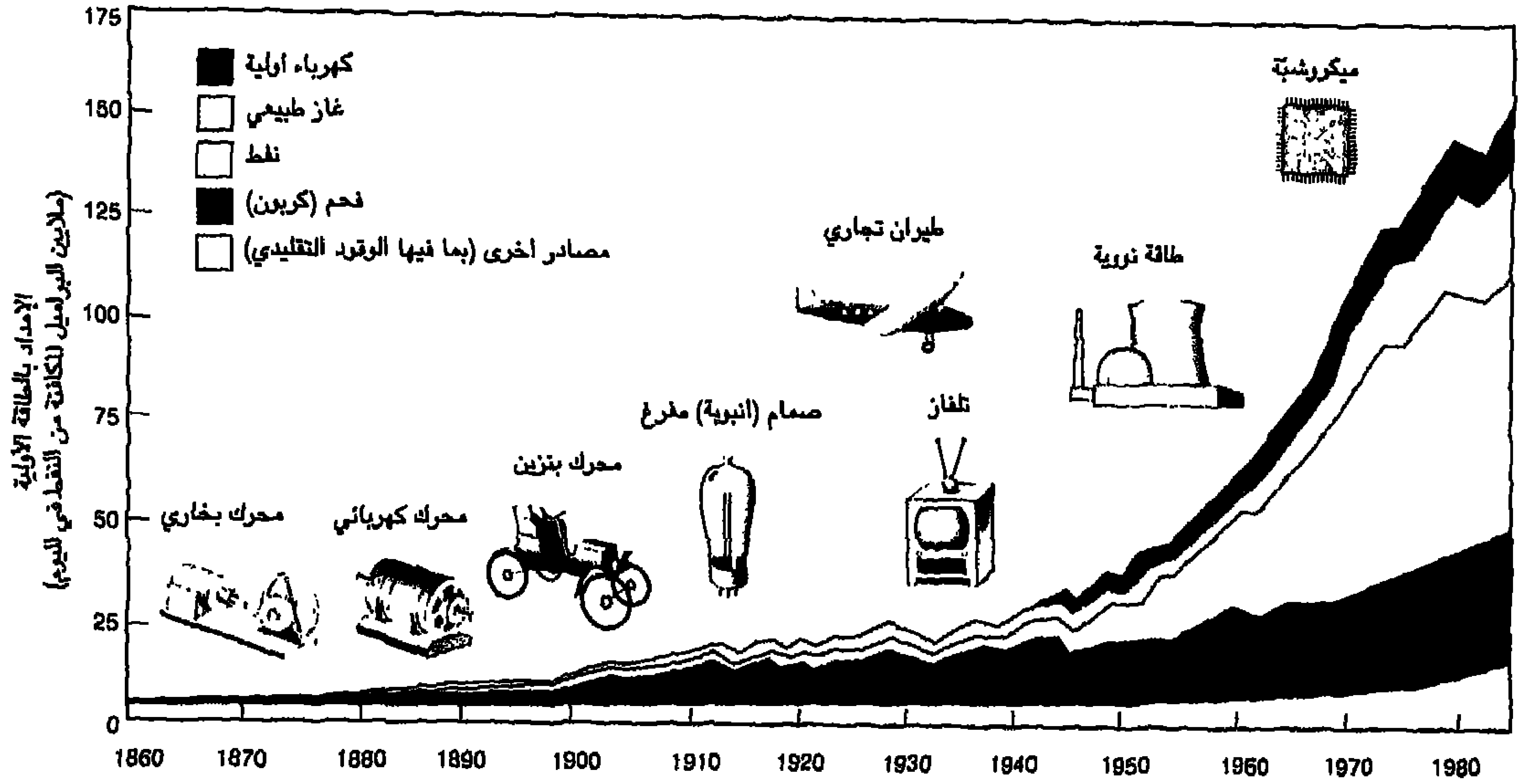
وإذا تمكن المجتمع من استغلال ولو قدر صغير من الإشعاع الشمسي الذي يسقط على سطح الأرض كل عام، والذي يكافئ 178000 تيراواط سنوي (أو نحو 15000 مرة قدر مورد الطاقة العالمي حالياً)، لأمكن حل مشكلاتنا المتعلقة بالطاقة. بيد أنه ينعكس من هذه الكمية 30 في المئة عائداً إلى الفضاء، ويمتص منها 50 في المئة تتحول إلى حرارة ثم يعاد إشعاعها. أما العشرون في المئة الباقية، فهي تبعث القوة في الدورة الهيدرولوجية (المائية). ولا يستمد (التركيب «البناء» الضوئي) Photosynthesis طاقته إلا من جزء صغير جداً (0.06 في المئة) من الإشعاع الشمسي، وهو الذي تشتق منه ــ في نهاية الأمر ــ الحياة كلها وأنواع الوقود الأحفوري بأسرها. وتلبي الطاقة المتجددة حالياً (متضمنة القوى المائية والكتلة الحيوية) 18 في المئة من احتياجات العالم من الطاقة، في حين تمثل الطاقة النووية 4 في المئة منها، أما الباقي فيزودنا به الوقود الأحفوري.

وقليل من الناس من يهتم بمصدر طاقتنا، إلا حين انقطاعها، ولكننا جميعاً ــ من الناحية العملية ــ نهتم بخدمات الطاقة التي تتراوح بين الاحتياجات الأساسية التي يتطلبها البشر في كل مكان ــ الطهي والتدفئة والإضاءة، وبين مظاهر المجتمع الحديث ــ المحركات والتجهيزات المنزلية والانتقالات البعيدة المدى والعمليات الصناعية المتنوعة. ولأن العالم لا يستطيع أن يعمل دون مورد منتظم من الطاقة، فإن جزءاً مهماً من الاقتصاد العالمي يخصص لتوفير هذه الخدمات عندما وأينما يكون هناك احتياج إليها.

وإضاءة غرفة ــ مثلاً ــ لا تتحقق بتحريك مفتاح فقط، ولكنها الخطوة الأخيرة في سلسلة طويلة من العمليات التحويلية. إذ ينبغي أولاً استخراج موارد الطاقة ــ مثل النفط غير المكرر، والغاز الطبيعي المستخرج من الآبار المحفورة عميقاً في قشرة الأرض، والفحم المحصور بين طبقات الرواسب الأرضية ــ فالطاقة الأولية (مثل النفط الخام)، تنقل إلى معمل تكرير حيث تحول إلى طيف واسع من المنتجات، ومن هناك يشحن زيت الوقود إلى محطة توليد الكهرباء لحرقه (وهكذا يتحول من طاقة كيميائية إلى طاقة حرارية). والحرارة الناتجة أثناء الاحتراق تقوم بتشغيل عنّفة (توربين)، تقوم بدورها بدفع مولد كهربائي (يحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية، ثم إلى طاقة كهربائية) وفي نهاية الأمر، تسري الكهرباء في الأسلاك حتى تصل إلى جهاز الاستخدام النهائي ــ مصباح التوهج ــ حيث تتحول إلى طاقة إشعاعية.

ويتطلب التوزيع غير المتساوي للوقود الأحفوري العالمي (النفط والغاز الطبيعي والفحم) ازدهار تجارة سلع الطاقة على مستوى العالم: إذ يتم الاتّجار دولياً بنحو 44 في المئة من النفط، و14 في المئة من الغاز، و11 في المئة من الفحم المستهلك. وتوجد أنظمة توزيع واسعة لخدمة هذه التجارة لضمان وصول الموارد إلى المستهلك. وينقل الغاز الطبيعي فوق سطح الأرض عبر نحو مليون كيلومتر من خطوط الأنابيب، وينقل النفط عبر 400000 كيلومتر من الأنابيب، هذا عدا أنظمة التوزيع المحلية. وتجوب نحو 2600 ناقلة محيطات الأرض حاملة النفط الخام، كما تقوم 65 سفينة أخرى بتوزيع الغاز الطبيعي السائل حول العالم.

ونتيجة لمثل هذا الطلب العالمي، تستنفد أنواع الوقود الأحفوري بمعدل أسرع بنحو 100000 ضعف السرعة التي تتكون بها. وقد بلغت حصة الفحم في موارد الطاقة العالمية ذروتها. ففي عام 1920 بلغت أكثر من 70 في المئة من الوقود المستخدم، ولكنها اليوم لا تفي إلا بنحو 26 في المئة من احتياجات العالم من الطاقة. وبلغ النفط ذروته في أوائل السبعينيات، بما يزيد قليلاً على 40 في المئة (وهو اليوم 38 في المئة). أما حصة الغاز الطبيعي الحالية (19 في المئة) فيتوقع أن تزداد أكثر من ذلك. وعلى الرغم من أنه يُعتقد أن الكمية المتبقية من الوقود الأحفوري القابل للاسترجاع تساوي 10 تريليون برميل من النفط، وهو ما يكفي لأن يستمر نحو 170 سنة أخرى بمعدلات الاستهلاك الحالية ــ سوف تستنفد مصادره في نهاية الأمر. وفي غضون ذلك، سوف يشكل هذا (إذا أحرق بأجمعه) خطراً محتملاً على البيئة.



معدل استخدام الطاقة الأولية والمساهمة النسبية للمصادر المختلفة يعكسان تطور التقانة وكذلك نمو الجماعة البشرية. فمثلاً تعد الزيادة السريعة في النفط بعد الحرب العالمية الثانية معبرة عن الزيادة في المشروعات الكبرى في النقل والصناعة. ويماثل ذلك أن الزيادة في الكهرباء في أواخر الستينيات تتوازى مع الزيادة في الاقتصاد الموجه للخدمات. وعلى الرغم من أن الوقود الأحفوري مازال يتصدر مصادر الطاقة الأولية، فإن حصة الفحم بلغت ذروتها نحو عام 1920، عندما كان يوفر أكثر من 70% من جملة الوقود المستهلك، وبلغت حصة النفط ذروتها في أوائل السبعينيات وكانت تزيد قليلاً على 40%. ومن المتوقع أن يسهم الغاز الطبيعي، وهو أقل تلويثاً من كل من النفط والفحم، بشكل أكبر في استخدام الطاقة على مستوى العالم.

فكيف يتسنى لنا أن نوفق بين مطالبنا المتزايدة بسرعة من الطاقة، وحاجتنا إلى الحفاظ على (نظام بيئي) Ecosystem عالمي صالح لاستمرار الحياة؟ لا يوجد هناك حل حتى الآن، فالأمور غير المؤكدة المتعلقة بمشكلات البيئة، مثل تغير المناخ، واختلاف وجهات النظر تجاه حلول التسوية بين النمو الاقتصادي والبيئة، يمكن أن تؤدي إلى تعدد السياسات والمشروعات الخاصة بتوفير الطاقة واستخدامها.

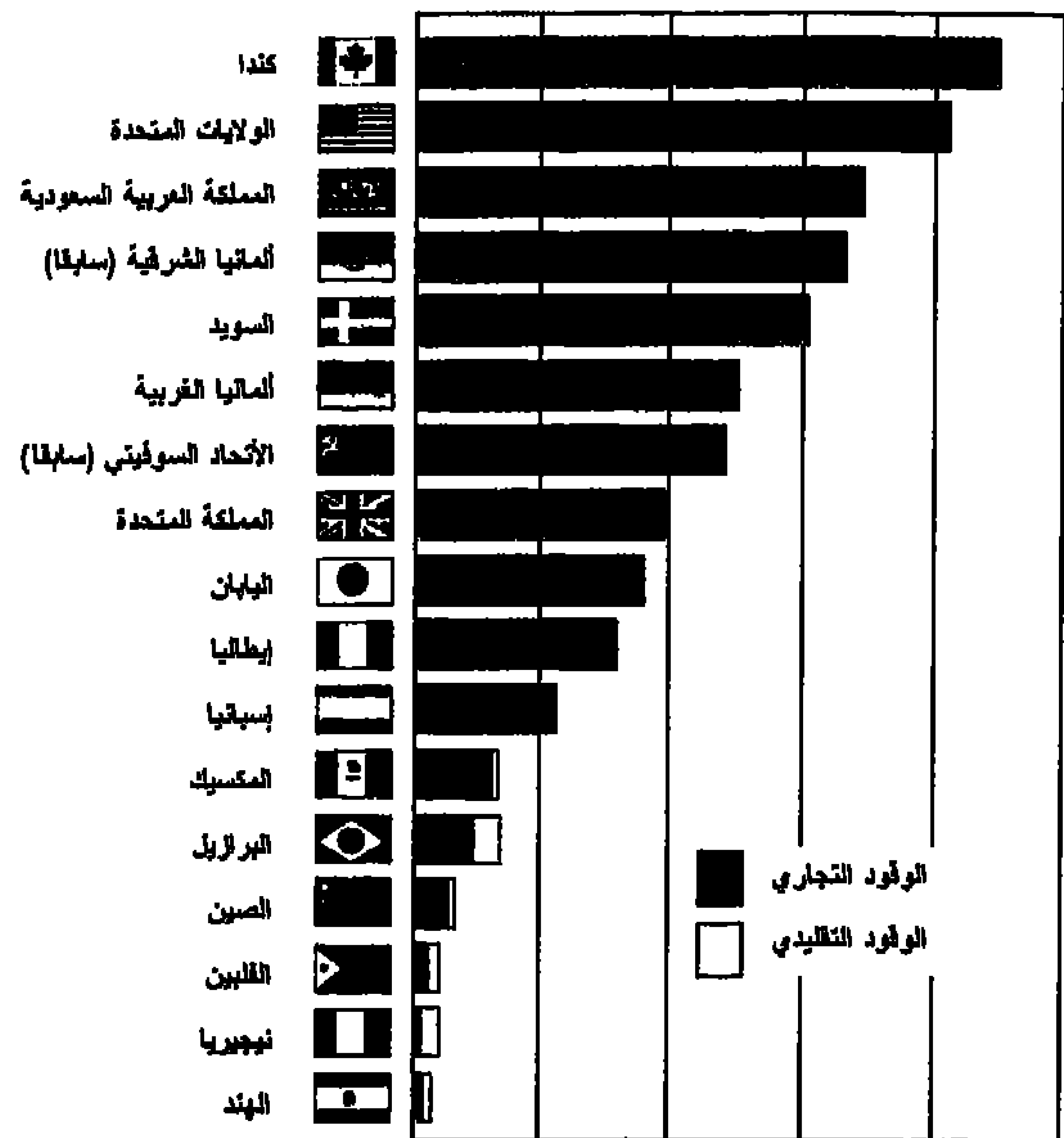
وإلى أود، لتبسيط الأمور، أن استكشف طريقين محتملين إلى المستقبل. (فالرأي الغالب) Consensus الذي يأخذ به الكثيرون يرتكز على الاستمرار في الاتجاهات الحالية، في حين أن وجهة نظر (العالم الصالح لاستمرار البقاء) Sustainable World، تفترض أن قضايا البيئة العالمية ستكون على جدول الأعمال الدولي في منتصف التسعينيات. ويقع تحت هذين المخططين الافتراض بأنه في عام 2010، سيصل تعداد سكان العالم إلى سبعة بلايين نسمة، وأن الإنتاج العالمي الكلي سيكون قد تضاعف.

ويتضمن «الرأي الغالب» أن عادات المستهلك وطرائق حياته لا يتوقع لها أن تتغير تغيراً ذا شأن، وأن سعر النفط الخام يحتمل زيادته تدريجياً، على الرغم من أن هناك احتمالاً بأنه قد يتخذ مساراً متذبذباً. ومن المتوقع أن يزداد الاستهلاك العالمي للطاقة بنحو 50 أو 60 في المئة عام 2010، وأن تبقى تشكيلة خليط أنواع الوقود العالمي، إلى حد كبير، كما هي اليوم. وهكذا، فإن انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) العالمية سوف تزداد كذلك بنحو 50 أو 60 في المئة. ويفهم ضمناً من وجهة النظر الغالبة هذه، أن «زيادة من الشيء نفسه» يمكن تحملها ودوامها، وأن تغير المناخ إما أن يكون قضية غير خطيرة، أو أن يكون شيئاً يستطيع البشر أن يتكيفوا معه.

وهناك كثير من عدم اليقين يحيط بقضية ارتفاع حرارة (احترار) الكرة الأرضية، ولكن إذا كانت الدراسات تعزز حقاً وجود رابطة بين انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون وتغير المناخ، فإن وجهة النظر الغالبة بشأن التنمية قد تكلفنا الكثير. ومثال ذلك، أن تقريراً صدر مؤخراً عن (اللجنة المشكلة من الحكومات بشأن تغير المناخ) Intergovenmental Panel on Climate Change يفيد أن تطورات «الأعمال الجارية كالمعتاد» يمكن أن تؤدي إلى زيادة متوسط درجة حرارة العالم خلال القرن القادم بنحو 0.3 درجة سيلزية (مئوية) كل عقد من الزمن، مما سيكون له وقع واضح على الأنظمة البشرية والطبيعية. وتدلنا التجربة على أن السياسة العامة يجب ألا تكون تكيفية فقط، ولكن يجب أن تكون توقعية كذلك، وهذا هو أساس وجهة نظر العالم الصالح لاستمرار البقاء.

ومع ذلك، فإن النظام الذي يمكّن المجتمع من إنتاج الطاقة لا يسلم قياده بسهولة لاستجابة مرنة وسريعة. فالبنية التحتية التي تنتهج سياسة تسعى لتوفر لشعبها مورداً كافياً وآمناً واقتصادياً وعادلاً.

وسوف يتأثر كثيراً تنفيذ مثل هذه السياسات بتطور التقانة، سواء أكانت مطبقة على تصميم أم تشغيل أنظمة الطاقة أم التحكم فيها. بيد أن تقدير المعدل الذي تدخل فيه التقانات الجديدة إلى السوق يمثل مشكلة عويصة، وذلك لأنه، في أغلب الحالات، ليس من اليسير علينا أن نتبين ـــ مقدماً ـــ الطبيعة البينية المتشابكة للتفاعلات التقانية. ومثال ذلك أن (التآزرات) Synergies التي لا يمكن التنبؤ بها بين المواد الجديدة والتقنيات الهندسية والتجهيزات الإلكترونية الدقيقة، وتقانات الاحتراق، قد أدت فعلاً إلى زيادة



توجد اختلافات كبيرة في الطاقة المستخدمة لكل فرد. ففي الولايات المتحدة وكندا أعلى المعدلات: فالمواطن المتوسط في هذين البلدين استخدم ما يكافئ 40 برميلاً من النفط عام 1988. ويقابل ذلك أن المواطن النيجيري المتوسط استخدم برميلين فقط، معظمهما على شكل وقود تقليدي. والمعدلات المرتفعة نسبياً في الاتحاد السوفييتي (سابقاً) وفي ألمانيا الشرقية (سابقاً) تعكس عدم الكفاءة التي توزع بها الطاقة وتستخدم هناك.

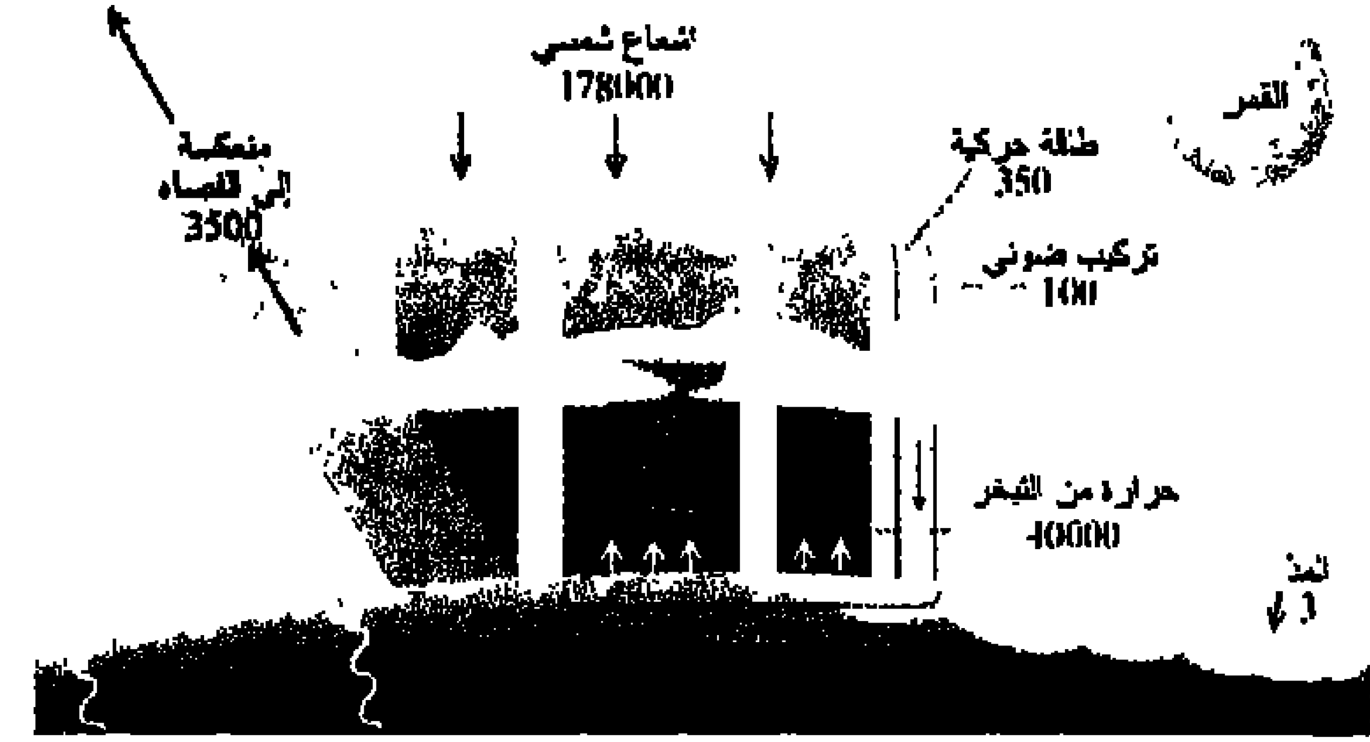
الكفاءة التي يمكن أن تستهلك بها السيارات الوقود *[انظر: «طاقة من أجل السيارات» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994]*. ولكن من المحتمل التوصل إلى زيادات أكثر من ذلك.

وسوف نستكشف الإمكانية الكبيرة للاقتصاد في الطاقة من خلال تقانة ذات كفاءة، حيث يقترح (أ.ب. فيكيت) و(س.و. جيلِنْكر) و(أ.ب. لوفنز)، أن إجراءات الكفاءة لها القدرة على خفض استهلاك الكهرباء في الولايات المتحدة بنحو 30 إلى 75 في المئة، وذلك في مقالتهم «نحو استخدام فعّال للكهرباء» في هذا البحث. ويستعرض (ر. بفنكتون) و(أ.هـ. روزنفلد) استراتيجيات متنوعة لخفض استخدام الوقود في المباني في مقالهما «طاقة من أجل المباني والبيوت» *[انظر مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994]*. ويمكن تحقيق وفر مماثل في القطاع الصناعي الذي يستهلك حالياً 40 في المئة من الطاقة المستخدمة في العالم النامي *[انظر: «طاقة من أجل الصناعة» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994]*.

وتتضمن التقانات الجديدة العالية الكفاءة مصابيح فلورية مدمجة (صغيرة الحجم) وغيرها من تجهيزات الإضاءة التي يمكن أن تخفض كمية الكهرباء المطلوبة للإضاءة بنحو 90 في المئة. كذلك تتوافر بعض المعدات المنزلية التي تستهلك من 10 إلى 20 في المئة فقط من الكهرباء التي تستهلكها المعدات المعتادة. والجيل الجديد من وسائل التحكم التلقائي (المؤتمت) يمكننا من جعل أنظمة الإضاءة والتدفئة والتهوية. وتكييف الهواء، تعمل بالصورة المثلى. وفي الصناعة، تبشر كل من (**دافعات السرعة القابلة للضبط**) Adjustable Speed Drives والمحركات ذات الكفاءة العالية، بتحقيق مقتصدات (وفورات) ذات شأن، وهذا ما يحققه أيضاً التقدم في تصميم العمليات المتكاملة، وتقانات التحكم والتدوير (**إعادة الاستعمال**) Recycling. وفي قطاع النقل، بدأت تحظى بالاهتمام تلك المركبات التي تسير 60 ميلاً أو أكثر بكل كالون من الوقود، والمركبات التي تسير بالغاز الطبيعي المضغوط أو بالهيدروجين أو الكهرباء.

كذلك ستكون التطورات في التنقيب عن النفط والغاز وفي إنتاجهما ذات أهمية. فاستعمال التقانة السيزمية (أي: الزلزالية أو الاهتزازية) الثلاثية الأبعاد، والحفر الأفقي ــ مثلاً ــ سوف يزيد من فرص الحصول على هذه المصادر، مع عدم رفع تكلفتها بشكل ذي شأن. والتقدم السريع في التقانات في قطاع الطاقة البديلة، الذي يصفه (س.ج. واينبرك) و(ر.هـ. ويليامز)، [انظر مقالة *«طاقة من الشمس» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994*]، يفتح الطريق لمزيد من الاحتمالات. وقد تضاعفت ــ تقريباً ــ الكفاءة المعملية (المخبرية) للخلايا الفوتوفلطية الشمسية منذ السبعينيات، ومن المتوقع أن تتحسن أكثر من ذلك. كذلك تستطيع عنفات الرياح المتغيرة السرعة المنافسة التجارية في بعض الأسواق، كما أن العمليات الجديدة لصنع وقود سائل من الكتلة الحيوية، تبشر ببدائل للنفط قابلة للتطبيق، ولو على نطاق أصغر. ويتوقع (و. هيفلة) أن يزيد خطر ارتفاع حرارة الكرة الأرضية من الطلب على الطاقة النووية زيادة ملحوظة، ويمكن تلبية هذا الطلب بوساطة مفاعلات آمنة بطبيعتها وغير قابلة للتحويل، تدار بإشراف سلطة دولية. انظر: *[مقالة «استغلال الطاقة النووية» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994]*.

وتتجه التقانة أيضاً إلى الابتعاد عن محطات توليد الكهرباء المركزية الكبيرة، والاتجاه إلى محطات لا مركزية صُغرى. وقد أدت التحسينات في الاتصالات الإلكترونية والتحكم وفي تقانة الحواسيب، إلى جعل مراقبة الشبكات المعقدة وتنظيمها من بُعْد، أكثر سهولة. وبظهور عنفات الغاز الجديدة والمحركات الصغيرة والخلايا الشمسية وبعض التقانات الأخرى، تنحسر الاقتصاديات ذات المقاييس الكبيرة التي طالما كانت إحدى سمات توليد الكهرباء. وقد لا تكون اللامركزية أكثر كفاءة فحسب، بل بإمكانها، كما يوضح (أ.ن.ك. ريدّي) و(ج. كولدِمْبرك)، *[انظر مقالة «طاقة من أجل العالم النامي» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 /1994]*، أن تقدم ركيزة للنمو الاقتصادي لبعض الدول الأكثر فقراً.



الإشعاع الشمسي الساقط على الأرض كل عام يساوي 178000 تيراواط أو نحو 15000 مرة مورد الطاقة العالمي الحالي. وينعكس منه في الحال 30 في المئة عائداً إلى الفضاء، في حين يمتص منها 50 في المئة، فيتحول إلى حرارة يعاد إشعاعها. أما الـ 20 في المئة الباقية لتحرك الرياح، وتدفع دورة الماء، وتزود التركيب الضوئي. ويمكن تصيّد بعض الطاقة على هيئة حرارة جيوحرارية من باطن الأرض، ويوجد قدر صغير (تولده جاذبية القمر) على هيئة قوة المدّ. والتقديرات الخاصة بالاحتمالات الكامنة لمصادر الطاقة المتجددة التجارية (أساساً، الطاقة المائية والكتلة الحيوية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الجيوحرارية)، على الرغم من عدم بيانها في الشكل، تشير إلى أنها قد تزداد في نهاية الأمر، من مستواها اليوم، وهو نحو تيراواط ــ سنوي واحد في السنة، إلى 10 أو ربما 15 تيراواط سنوي في السنة. وسوف تعتمد الزيادة في الطاقة المتجددة على تكلفتها، وعلى العقوبات البيئية.

وعلى المدى البعيد، يبدو أن مثل هذا التقدم التقاني سيخفض للتكاليف الكلية المقترنة بالحد من انبعاث ثنائي أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري. وبصفة عامة، فإن أزمنة الاستجابة ــ من الفكرة خلال النموذج الأولي، إلى المنتج التجاري ــ قد بدأت بالتناقص، وهذا نمط يتوقع أن يستمر. ويتوقع الصناعيون اليابانيون، مثلاً، أن يتم ــ خلال السنوات القليلة القادمة ــ تصميم السيارات وإنتاجها في نصف الوقت، وبربع كلفة نماذج اليوم. واتجاههم هذا يُبرز دور التنافس العالمي كعامل محرك للتغير التقاني. ونظراً لتوقع تقدم مماثل في مناح أخرى من التصنيع، فقد نُدهش من سرعة الاستجابة لحوافز جديدة.

ومع ذلك، سوف تدفع التقانة المجتمع نحو صلاح استمرار البقاء بسرعة أكبر، فيما لو استطاع صناع السياسة أن يتفقوا على خطوط توجيه عالمية مناسبة. ولو قدر أن يكون هناك أي تغير ذي شأن في بنية موارد الطاقة واستخداماتها خـــلال السنوات العشرين القادمة، لوجب أن تكون هناك سياسات جديدة نافذة في منتصف التسعينيات، مما يعني أن على أعضاء المنظمة OECD أن يتفقوا عندئذ على بروتوكول يوقف احتمال تغير مناخ الكرة الأرضية.

وبوجه عام، فالاختيارات الرئيسية هي استبعاد مركبات الكلوروفلوروكربون (التي تستنفد أوزون الاستراتوسفير، وتسهم في ارتفاع حرارة الكرة الأرضية)، والبدء ببرامج لتنمية الغابات لزيادة تصريف الكربون، وتخفيض انبعاث CO_2 من الوقود الأحفوري. ويمكن تحقيق هذه الأهداف بتحسين الكفاءة التي يتحول بها الوقود الأحفوري ويستهلك، وبالتحول إلى أنواع بديلة من الوقود، وبخاصة من وقود غني بالكربون إلى وقود غني بالهيدروجين. ويتم حالياً تطوير تقانات إزالة ثنائي أكسيد الكربون من الفحم، على الرغم من أن طرائق استبعاد CO_2 مازالت تنتظر إيجاد حل لها *[انظر مقالة «طاقة من الوقود الأحفوري» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12/1994].*

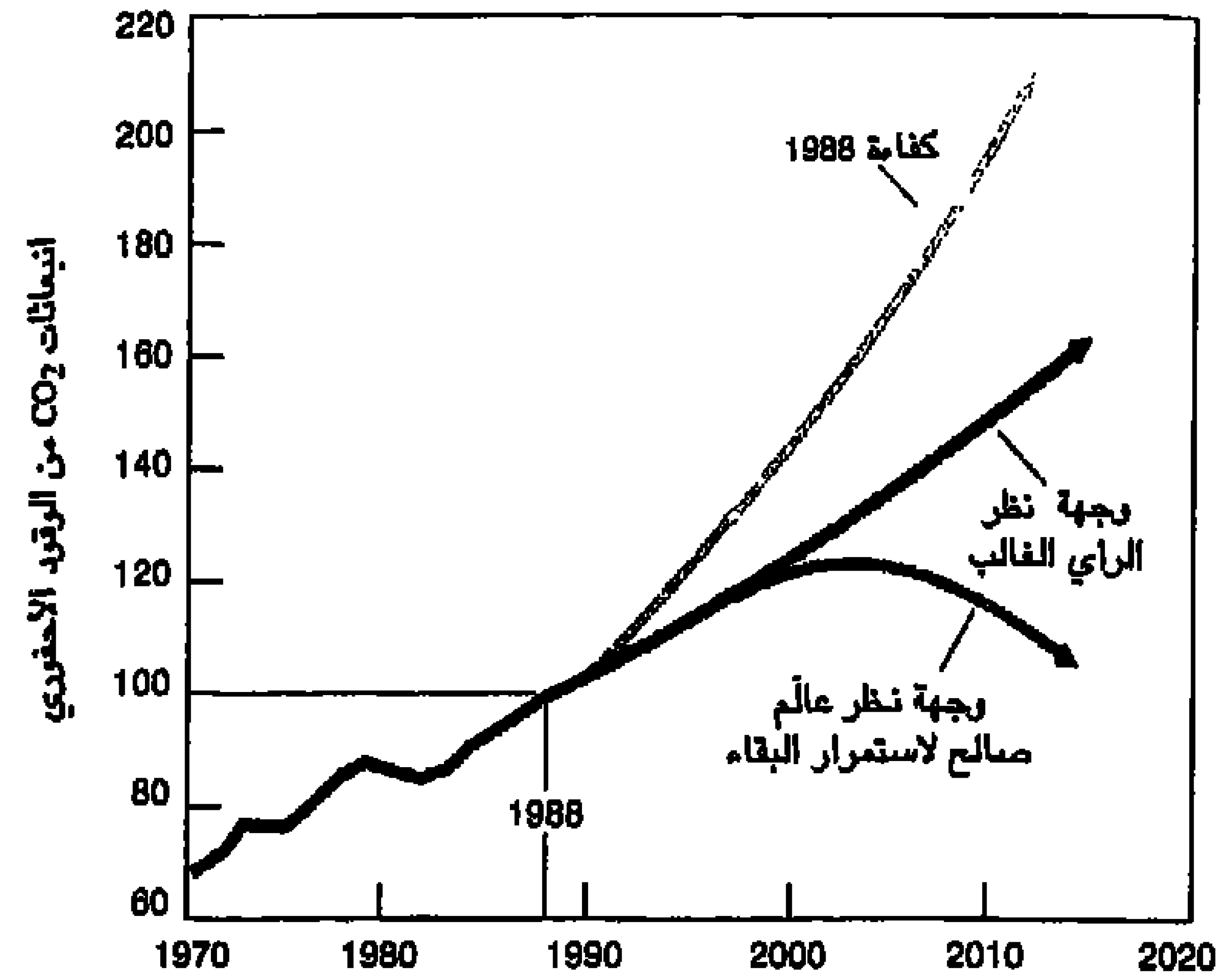
وعلى الرغم من حتمية وجود اختلافات بين كل بلد وآخر، فمن المتوقع أن تكتسب بعض السياسات تأييداً واسعاً. ومن بينها مبدأ «من يُحدث التلوث يدفعْ»، وهو ينادي بأن على المستفيد أن يتحمل التكلفة الكاملة لاستخدام المورد، وأن تكون السوق هي الحكم في العرض والطلب. ويجب أن نتذكر كذلك أن انبعاث CO_2 بالنسبة لكل فرد، يزيد 10 مرات في دول المنظمة OECD عنها في الدول النامية، وتتضح بذلك ضرورة وجود اتفاقية عادلة خاصة بالتخفيضات المناسبة.

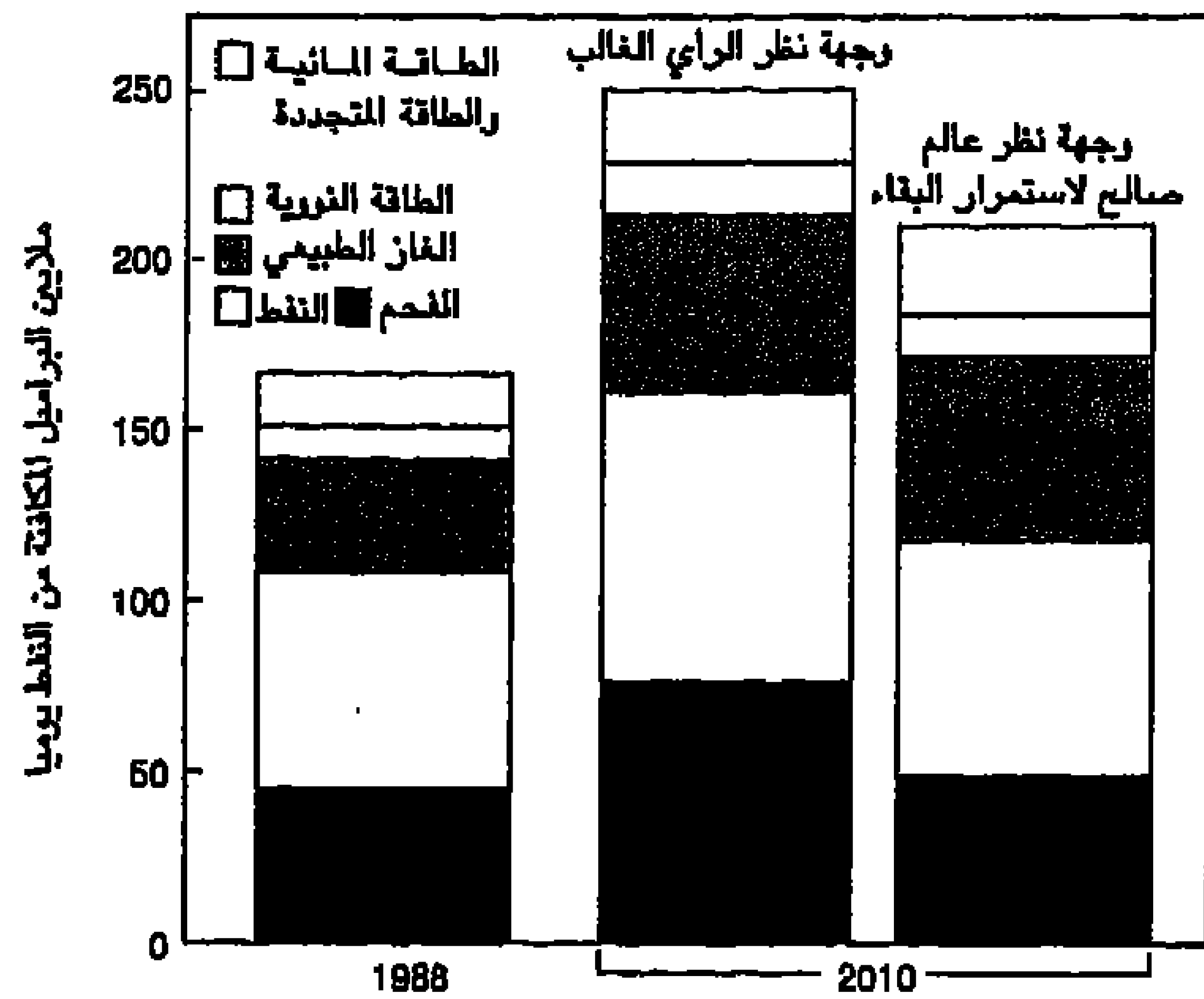
إن إشراك الدول النامية، وكذلك دول أوروبا الشرقية، والاتحاد السوفييتي (السابق)، والصين في الاستجابة لمتطلبات الطاقة العالمية سيكون أمراً حرجاً؛ وذلك لأنه، في كثير من هذه الدول، يُعد الإصلاح الاقتصادي نقطة بداية ضرورية. إن تدويل الأعمال الجاري حالياً، يقوي الأمل في انتشار سريع للتقانة من أحد أجزاء العالم إلى الجزء الآخر. [انظر:

«Energy for the Soviet Union, Eastern Europe and China, W.U.Chandler – A.A.Makarov -Z. Dadi; Scientific American. September 1990].

والمدى الذي يتطلبه برنامج فعّال، لم يتم تعيينه بعد. وتقدر دراسة حديثة أعدت للمؤتمر الوزاري الذي عُقد عام 1989، حول تلوث الغلاف الجوي وتغير المناخ، في نوردفيك بهولندا، أن التكاليف الرأسمالية لبرنامج وقائي يهدف إلى استبعاد كامل لمركبات الكلوروفلوروكربون وإدارة موسعة للغابات والحفاظ على الطاقة، تصل إلى نحو 0.8 في المئة من الناتج المحلي الإجمالي (النما) (GDP). ولو نفذ هذا البرنامج كاملاً، لأمكنه تخفيض انبعاث غازات الدفيئة المتوقعة في دول المنظمة OECD بنحو 30 في المئة عام 2005. ولكن الالتزام الكامل بصلاحية استمرار البقاء قد يتطلب أكثر من ذلك. وقد تكون هناك حاجة إلى زيادة المصروفات البيئية المناسبة إلى نحو 1 أو 2 في المئة من الناتج المحلي الإجمالي (GDP).

ويمكن إجراء تحولات بهذا القدر على امتداد عقد واحد أو عقدين، مع احتمال حدوث اضطراب اقتصادي ضعيف. وكانت قد حدثت من قبل تحولات مماثلة، بل حتى أكبر منها. فمثلاً، انخفضت المبالغ التي أنفقها المستهلكون في الولايات المتحدة على الغذاء بنحو 6 في المئة فيما بين عام 1965 وعام 1985، في حين ازدادت مصروفات الرعاية الطبية من 6 إلى 11 في المئة خلال المدة نفسها. وفي الوقت نفسه، انخفضت مصروفات الطاقة في دول المنظمة OECD من 12 في المئة من الناتج المحلي الإجمالي (GDP) عام 1980 إلى 8 في المئة فقط عام 1988. وعلى الرغم من





مخططان يصوران تشكيلة الطاقة العالمية عام 2010 (في اليسار). تتخذ وجهة نظر الرأي الغالب موقف «الأعمال الجارية المعتادة»، مع نمو شامل في الاستهلاك. وتحبذ وجهة نظر عالم صالح لاستمرار البقاء تحسينات جذرية في الكفاءة مع تثبيت الطلب بعد عام 2000. وفي وجهة نظر الرأي الغالب يتوسع الفحم والنفط توسعاً سريعاً، في حين أنه في وجهة نظر عالم صالح لاستمرار البقاء، يتقلص الفحم ويرتفع الغاز الطبيعي ارتفاعاً كبيراً. وسوف تزداد الطاقة المائية والوقود المتجدد التجاري بنحو 60 في المئة. وستزداد انبعاثات CO_2 حتى عام 2000 (في اليمين)، ولكن حصيلتها ستعتمد حينئذ على سياسات يكون قد تم اختيارها في التسعينيات. وإذا ازداد استخدام الطاقة بسرعة تماثل سرعة النمو الاقتصادي، فإن انبعاثات CO_2 سوف تتضاعف في عام 2010. ومع زيادة كفاءة الطاقة، ستزداد الانبعاثات في مخطط الرأي الغالب بمعدل يصل إلى نصف هذه السرعة. وبالمقابل، في وجهة نظر عالم صالح لاستمرار البقاء، سوف تصل انبعاثات CO_2 إلى ذروتها بعد عام 2000، على الرغم من أنها ستكون في عام 2010 لا تزال أعلى بنسبة 15 في المئة عما هي عليه اليوم.

أن تمويل البيئة الحالي غير موثق توثيقاً جيداً فإنه يحتمل أن يكون وسطاً بين 2 أو 3 في المئة من الناتج المحلي الإجمالي (GDP) بالنسبة لمعظم دول المنظمة OECD. وزيادة هذا المقدار إلى 4 أو 5 في المئة أمر ممكن بالتأكيد (خاصة إذا انخفضت ميزانيات الدفاع لكثير من الدول، كما هو متوقع).

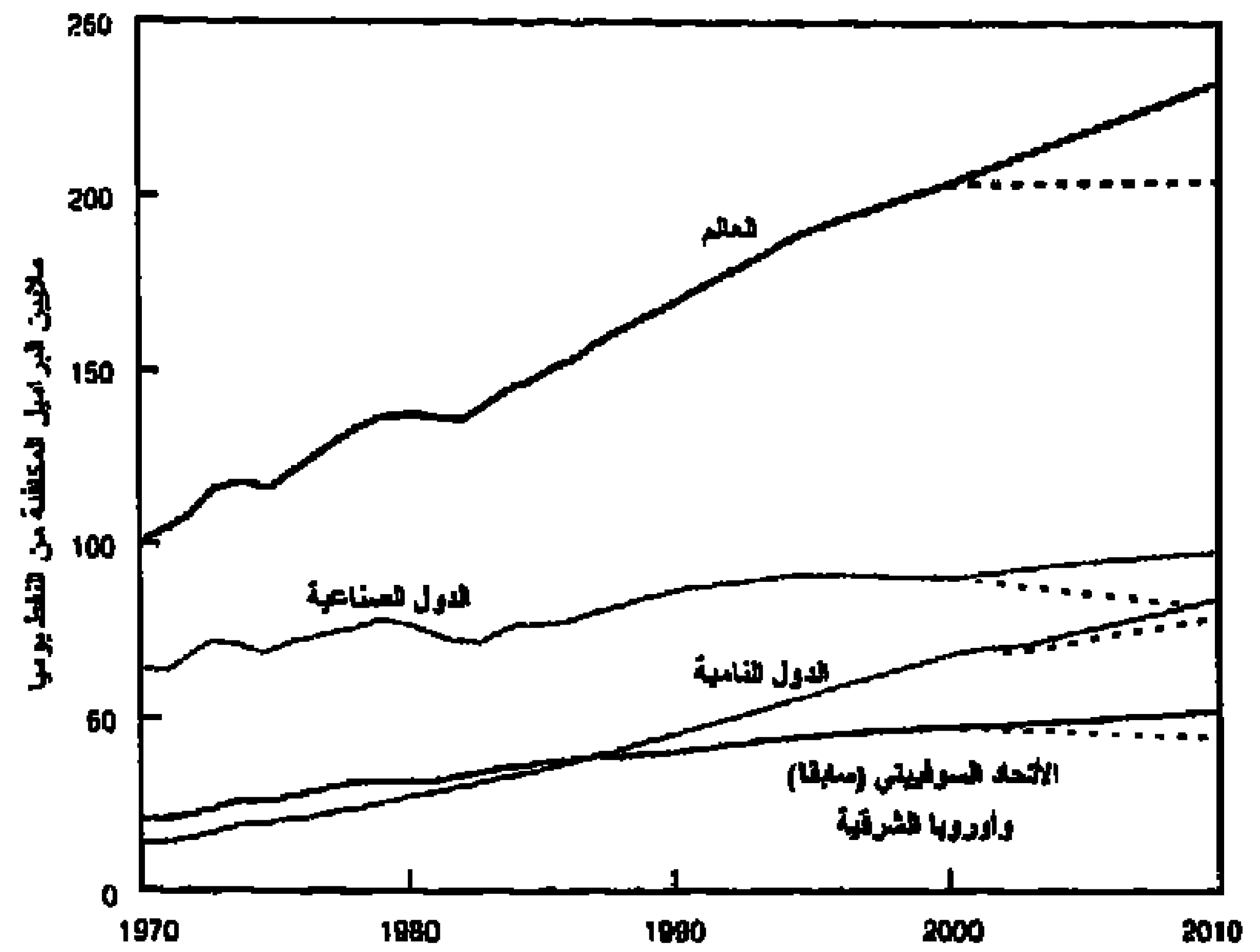
وفي عالم يتبنى صلاحية استمرار البقاء، ويقدم الحوافز المناسبة لإحداث التغيير، يمكننا أن نتوقع النتائج التالية في قطاع الطاقة. فإذا افترضنا أن النمو السكاني والنمو الاقتصادي هما نفسهما كما في وجهة نظر الرأي الغالب، وأن البروتوكولات الدولية قد وضعت موضع التنفيذ في منتصف التسعينيات، فإن مورد الطاقة الأولية العالمي يمكن تثبيته بما يكافئ نحو 205 ملايين برميل من النفط في اليوم بحلول عام 2000. وهذا في حد ذاته يمكن اعتباره عملاً بطولياً. وحتى مع مثل هذا البرنامج، ستصبح انبعاثات CO_2 من الوقود الأحفوري أعلى بنسبة 25 في المئة عام 2000 عما هي عليه اليوم. وعلى الرغم من تحول ملموس من الفحم إلى الغاز الطبيعي (مضافاً إليه زيادة في موارد الوقود المتجدد، مع كفاءة أكبر)، فإن انبعاثات CO_2 سوف تكون ــ مع ذلك ــ أعلى في عام 2010 عما هي عليه اليوم.

وفي عالم صالح لاستمرار البقاء، سينتقل ميزان المبادرات الجديدة من المنتج إلى المستهلك، ومن توريد الطاقة إلى خدمات الطاقة، ومن كمية الطاقة إلى نوعها. وتَبنّي عدد من الاختيارات التي تؤدي إلى تكامل خدمات الطاقة المطلوبة مع تخطيط المدن والمناطق، يمكن أن يكون خطوة سياسية مهمة. وكما يشير (بليفيس) و(والزر)، يمكن أن تصرف قوانين تنظيم المناطق الناس عن الانتقال اليومي بالسيارة، وقد تقلل الأنظمة الجديدة لتوجيه حركة المرور من تلوث هواء المدن. ويبرز (بفنكتون) و(روزنفلد) أهمية زراعة الأشجار الظليلة وطلاء المباني بألوان فاتحة وعاكسة للضوء في تقليل استخدام الطاقة في مناطق المدن. وقد تفتح التغيرات في البنية الأساسية لوسائل النقل الحالية، مثل قطارات (ماكليف)[2] Maglev المقترح إدخالها في أوروبا، مجالاً لاختيارات إعادة التفكير في شبكات الطرق والطيران والسكك الحديدية.

والاستجابة الجماعية لعالم صالح لاستمرار البقاء يمكن أن تتضمن «سلالة» جديدة من شركات الطاقة تدفعها الرغبة في أن توفر لعملائها مدى أوسع من تقانات الطاقة المتقدمة. ويمكن أن يكون لمثل هذه الشركات فعاليات على نطاق واسع. فمثلاً، قد تكون هناك سوق لأنظمة النقل الجماعي في بعض مناطق المدن، يديرها القطاع الخاص. وفي بعضها الآخر، قد يُحدث حظر استخدام محركات الاحتراق الداخلي تسهيلات لأماكن وقوف السيارات الكهربائية وإعادة شحن بطارياتها. وحين تصبح المؤسسات أكثر توجهاً للخدمة، فإنه من المحتمل جداً أن تتوسع بهدف القيام بهذه الخدمات. والحاجة إلى التحرك بسرعة يجب أن تشجع كذلك نوعاً من التحالف في البحوث والتنمية بين شركات الوقود وصنّاع معدات الاحتراق. ويمكن أن يُنتج مثل

---

(2) قطارات ترتفع عن القضبان بفعل مجال مغنطيسي والكلمة مركبة من كلمتي: Magnetic Levitation. (المحرر)



ينتظر أن يتغير الطلب على الطاقة الأولية من جزء إلى آخر من العالم. وستحدث أكثر الزيادة ــ على الأغلب ــ في الدول النامية، حيث ترتفع فيها معدلات نمو السكان، وتجري فيها عمليات توسع المدن والتصنيع. وعلى العكس من ذلك، ينتظر أن يبقى الطلب ثابتاً في الدول الصناعية أو ينخفض، حيث معدلات نمو السكان منخفضة. ويمكن أن يثبت الطلب أو ينخفض، في أوروبا الشرقية وفي الاتحاد السوفييتي (سابقاً)، ويعتمد ذلك على نجاح الإصلاحات الاقتصادية. ويتوقف الكثير على أيٍّ من سياستي الرأي الغالب أو الصلاحية لاستمرار البقاء، سيوضع موضع التنفيذ.

هذا التعاون أنواعاً من الوقود والمحركات والعمليات لم يتوقعها أحد بعد. وقد بدأت فعلاً بداية متواضعة في الولايات المتحدة، حيث تنتج بعض شركات النفط بنزيناً معدلاً، وأنواعاً بديلة من الوقود.

ويبدو للكثيرين أن الانتقال إلى عالم صالح لاستمرار البقاء حافل بعدم اليقين وبالمعضلات. وربما كان هذا طبيعياً، إذ يبدو أننا نعيش بين قصتين يُعَبَّر عنهما بوجهتي نظر الرأي الغالب والعالم الصالح لاستمرار البقاء. أما بالنسبة للآخرين فإن الموقف أكثر تحديداً: بالنسبة لهم، تبدو قصة العالم الصالح لاستمرار البقاء أنها هي قصة زمننا هذا، وهو الزمن الذي تحتاج فيه الكائنات البشرية إلى إعادة تأكيد دورها كرعاة مسؤولين *[انظر «الطاقة في مرحلة تحول» مجلة العلوم المجلد 10 العدد 12 عام 1994].*

ومع تعلمنا أكثر عن علاقة البشر بكوكبهم، فقد نجد أنه بدلاً من النظر إلى الطاقة على أنها سلعة يمكن استغلالها من كوكب الأرض، ستزداد حاجتنا إلى التفكير وإلى التصرف على أساس أنها طاقة من أجل كوكب الأرض. وسوف يستمر اعتمادنا على الطاقة، ولكن ذلك يجب أن يحدث على أساس كوكب صالح بيئياً. ويعني هذا أن على الكائنات البشرية أن تستخدم كل مواهبها الابتكارية لتطوير تقانات جديدة للطاقة حتى تضمن جودة طويلة الأمد لموطنها.

المؤلف

Ged R. Davis

هو رئيس الطاقة في مجموعة التخطيط بشركة شل الدولية المحدودة للنفط في لندن. يحمل درجة البكالوريوس في هندسة المناجم (التعدين) من جامعة لندن، ودرجتي ماجستير في الاقتصاد من مدرسة لندن للاقتصاد وفي الهندسة والاقتصاد من جامعة ستانفورد. وقد قام خلال العقد الأخير بإجراء العديد من التحليلات البيئية لشركة شل، وقام ــ بخاصة ــ بفحص الطرائق التي يمكن أن تكيف صناعات الطاقة العالمية نفسها للاحتفاظ بعالم صالح للبقاء.

مراجع للاستزادة

EXPERT SEMINAR ON ENERGY TECHNOLOGIES FOR REDUCING EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES. Collected Papers. Organisation for Economic Co-Operation and Development and International Energy Agency, Paris, April 12-14, 1989.

ENERGY FOR TOMORROW. Collected Papers. Fourteenth Congress of the World Energy Conference, Montreal, September 17-21, 1989.

TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT. Edited by Jesse Ausubel and Hedy E. Sladovich. National Academy Press, 1989.



مواد الحياة الأولية المقذوفة من بعيد (*)

قد تدين الحياة بنشأتها لجزيئات عضوية معقدة صنعت في اللب الجليدي لغيمة ممتدة بين النجوم(1)

<P.M. بيرنشتاين> <A.S. ساندفورد> <j.l. ألاماندولا>

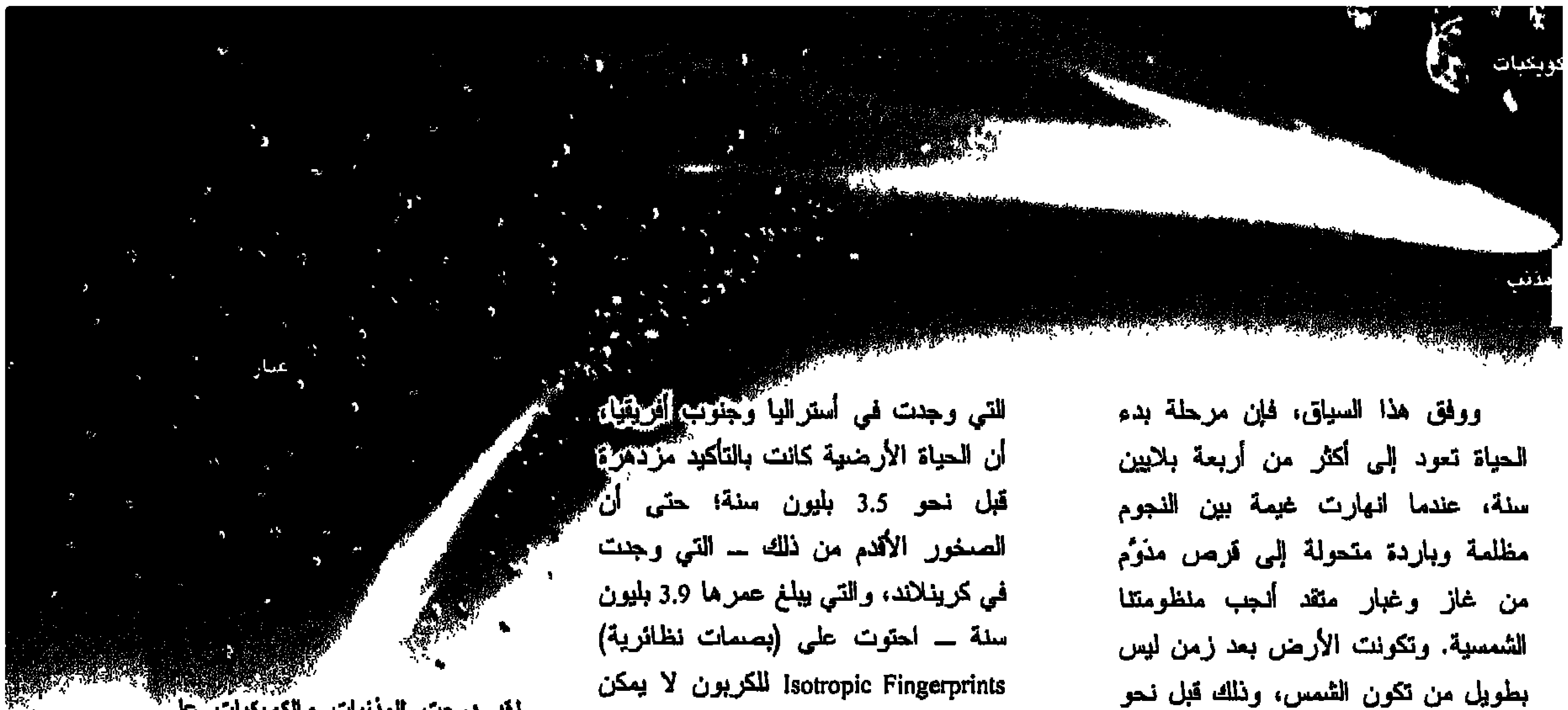
على مدى قرون عديدة ارتبطت المذنبات – في العقل البشري بالكوارث.ففي عام 400 قبل الميلاد أعد الفلكيون الصينيون رسوما تخطيطية لتسعة وعشرين نوعا من المذنبات التي ينبئ العديد منها بحدوث الكوارث. وقد ظلت فرضية أرسطو التي تقول بأن المذنبات ليست سوينذير من الآلهة, ترزح على صدر الحضارة الغربية نحو ألفي عام بدءا من أوج الحضارة اليونانية القديمة. وبقيت المذنبات والنيازك حتى مشارف القرن العشرين تؤدي أدوار رئيسية في الأفلام السينمائية التي تتناول يوم الحشر أو قصص الدمار الشامل. وتبين اليوم أن تهديد المذنبات ليس إمرا خرافيا, فقد كشف العلم الحديث النقاب عن اصطدام هائل ربما كان السبب في هلاك الدينوصورات. وفي عام 1994 راقب الناس بقلق المذنب شوميكر–ليفي 9 وهو يصطدم بكوكب المشتري.

ومن المتغرب أن يكون ذلك الحطام الفضائي السيئ السمعة الوافد من بعيد,هو المسؤول عن جعل الأرض على ما هي عليه اليوم, كوكبا لطيفا مليئا بالحياة. لقد بدأ علماء الفضاء منذ أوائل الستينات بالتكهن بأن المذنبات والمخلفات الأخرى الناتجة من تشكل المنظومة الشمسية أدت إلى انهمار جزيئات الماء والغازات على الأرض, وأن هذه المكونات هي التي شكلت الجو والمحيطات التي جعلت الكوكب صالحا للسكن. ويعتقد الأن عدد كبير من الباحثين, ومن بينهم فريقنا العامل في مختبر الكيمياء الفلكية التابع لمركز أبحاث الإدارة القومية لعلوم الطيران والفضاء (ناسا) في إيمس أن بعض المواد المهمة اللازمة لنشوء الحياة وجدت طريقها إلى الأرض من الفضاء وقد شكلت بعض هذه الجزئيات العضوية (غير . خارج . الأرضية) Extraterrestrial محافظ راشحة يحتمل أن تكون قد احتضنت السيرورات الحيوية الأولى. ويحتمل أن تكون بعض الجزئيات الأخرى قد امتصت جزءا من أشعة الشمس فوق البنفسجية لتحمي بذلك جزئيات أقل قدرة على التحمل,وربما تكون قد ساعدت على تحويل تلك الطاقة الضوئية إلى غذاء كيميائي.

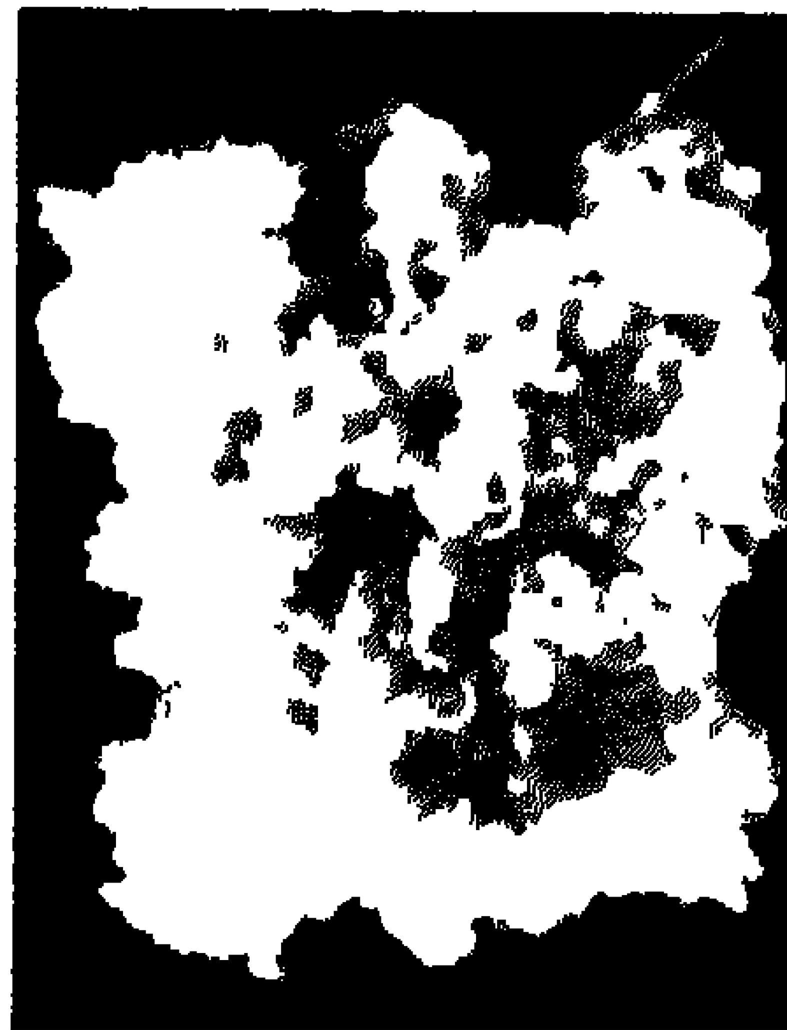
(*) Life's Far-Flung Raw Materials

(1) interstellar. بنجمية.

إن جزيئات عضوية معقدة - لها مثيلاتها في الأشياء الحية - تسود في الأجزاء المظلمة من غيوم ممتدة بين النجوم. لقد انهـارت قبل ماينـوف على أربعة بلاين سـنة واحدة من تلك الغيوم مشكلة قرص مدوّما أنجبت الشمس والكواكب. وقد نجت بعض الجزيئات الهشـة من الحرارة العنيفة التي رافقت تشكل المنظومة الشمسية بالبقاء متجمعة في المذنبات عند الحافة الباردة للقرص المدوم. وقامت المذنبات وباقي مخلفات الغيمة بنقل هذه الجزيئات إلى الأرض.



لقد درجت المذنبات والكويكبات على الارتطام بالأرض بقوة قبل نحو أربعة بلايين سنة. وحتى الآن مازالت الأرض تكتسب مئات الأطنان من الغبار والنيازك الناجمة عن هذه الأجسام كل يوم. ويعتبر العديد من الجسيمات الغبارية (الصورة) التي لا يتجاوز قطر معظمها جزءاً من الألف من المليمتر. غنياً بالجزيئات العضوية التي صنعت في الغيمة القاتمة التي أنتجت المنظومة الشمسية، ويفترض أن الفجوات في الجسيم السفلي احتوت في الماضي على الجليد الذي تبخر عندما ابتعد الغبار عن مذنبه الأم.



حبيبة غبار

ووفق هذا السياق، فإن مرحلة بدء الحياة تعود إلى أكثر من أربعة بلايين سنة، عندما انهارت غيمة بين النجوم مظلمة وباردة متحولة إلى قرص مدوّم من غاز وغبار متقد أنجب منظومتنا الشمسية. وتكونت الأرض بعد زمن ليس بطويل من تكون الشمس، وذلك قبل نحو 4.5 بليون سنة. وقد ساد الاعتقاد مدة طويلة أن الأرض احتوت على الماء ومقومات الحياة الأخرى منذ ذلك الوقت. ومع هذا، يظن العديد من العلماء اليوم أن الأرض كانت عند نشأتها حارة وجافة ومجدبة. ومن المعروف الآن أن الحطام الفضائي قام بقصف كوكب الأرض الحديث النشأة، مما أدى إلى حدوث جائحات تكافئ في قوتها ما ينجم عن تفجير عدد لايحصى من القنابل الذرية. وقد لا يكون القمر، في الواقع، سوى قطعة من الأرض انفصلت عنها لدى اصطدامها بجرم فضائي يكافئ في الحجم كوكب المريخ *[انظر: «التراث العلمي لرحلة أبولو»، العلوم، العدد 11(1995)، ص17]*. وكانت الاصطدامات التي من هذا النوع شائعة حتى ما يقارب الأربعة بلايين سنة الماضية، وقد أجهضت هذه الاصطدامات بالتأكيد أي فرصة لظهور بذرة الحياة قبل ذلك التاريخ.

وفي الوقت الذي تحاول فيه الأبحاث الحديثة تبكير تاريخ اليوم الذي صار فيه كوكب الأرض قابلاً للسكنى، تؤخر اكتشافات أخرى تاريخ ظهور أولى علامات الحياة على الأرض. وتوضح الأحافير المكروية (المستحاثات الصغرية)، المكتشفة في الصخور القديمة التي وجدت في أستراليا وجنوب أفريقيا، أن الحياة الأرضية كانت بالتأكيد مزدهرة قبل نحو 3.5 بليون سنة؛ حتى أن الصخور الأقدم من ذلك ــ التي وجدت في كرينلاند، والتي يبلغ عمرها 3.9 بليون سنة ــ احتوت على (بصمات نظائرية) Isotropic Fingerprints للكربون لا يمكن إرجاعها إلا لمتعضية (لكائن حي) ما. وبتعبير آخر فإن المتعضيات، وبعد نحو 100 مليون سنة من بدء المرحلة المبكرة التي تمكنت الأرض فيها من رعاية حياة آمنة، كانت في حالة كافية من الازدهار مكنتها من ترك آثارها التي بقيت حتى يومنا هذا. إن هذه الفترة القصيرة من الزمن التي انبثقت خلالها الحياة تقتضي أن يكون سيرورة نشوئها قد تطلبت العون من الجزيئات الفضائية.

يفترض أن أولى الكائنات الوحيدة الخلية التي ظهرت على كوكب الأرض قد نشأت عبر سلسلة من الخطوات الكيميائية التي قادت إلى إنتاج جزيئات غنية بالكربون مثل الأحماض الأمينية، والتي ارتبطت تحت ظروف مواتية مكوِّنة سلاسل بروتينية، وهي لبنة الحياة الأساسية. إن أحد الباحثين الأوائل الذين أوضحوا كيفية تشكل تلك الأحماض الأمينية البدئية هو (س.ل. ميلّر) [عندما كان طالب دراسات عليا في مختبر (هارولد س. أوري) بجامعة شيكاغو] وذلك في أوائل الخمسينيات. ويقوم (ميلر) الآن [وهو في جامعة كاليفورنيا بسان دييكو] بتسليط شرارات مماثلة للبرق على «جو» بدائي مؤلف من جزيئات بسيطة غنية بالهيدروجين موجودة في قارورة(حوجلة) زجاجية مغلقة. وبعد مرور عدة أسابيع

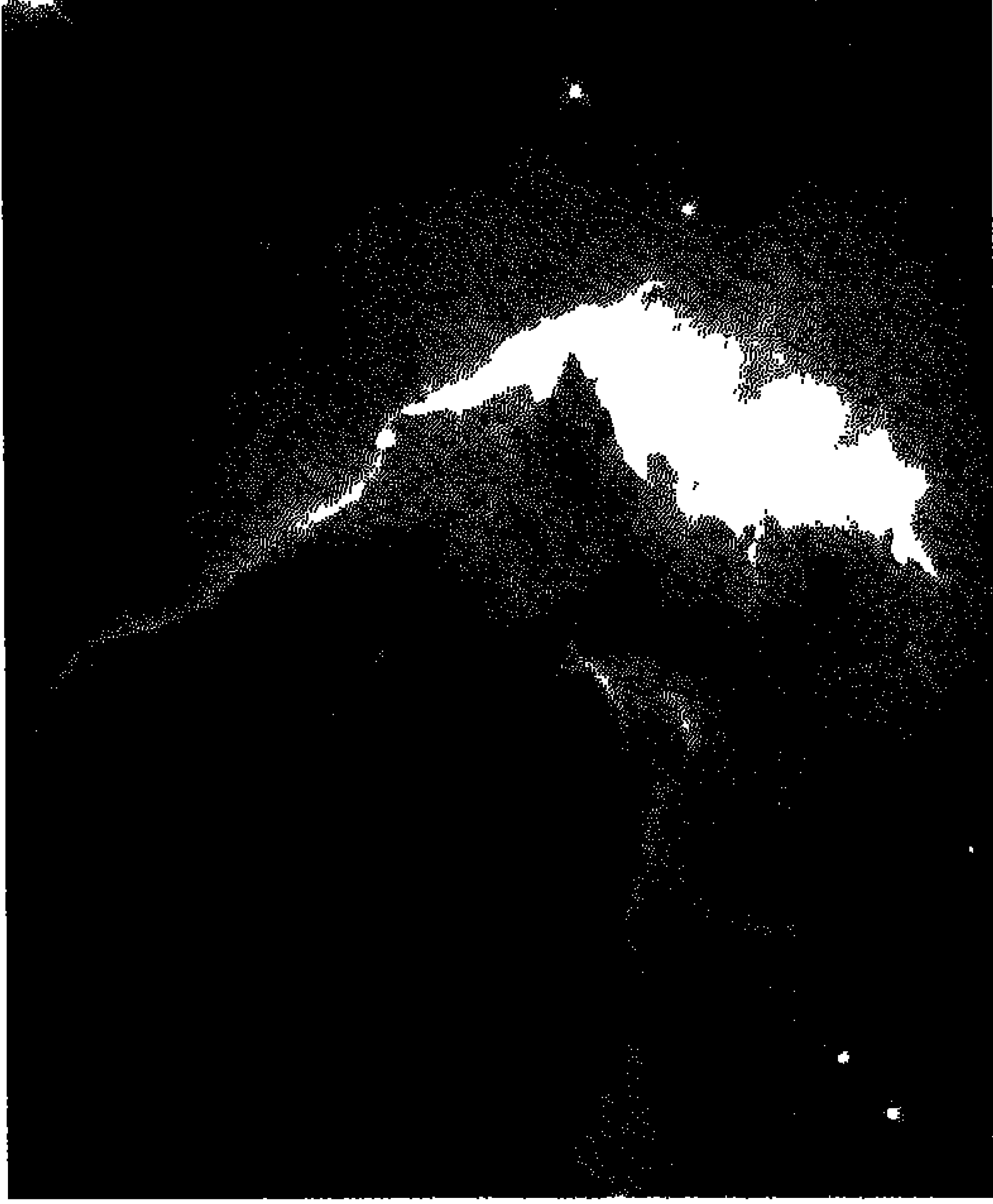
وجد أن التفاعل أعطى، في قارورة ثانية وُضعت لمحاكاة مياه المحيط العميقة، عدداً كبيراً من الجزيئات العضوية ومن ضمنها الأحماض الأمينية.

أدى دليل جديد إلى الشك في مسألة مكونات جو (ميلّر)، إلا أن نظرية (الحساء البدائي) Primordial Soup التي وضعها لتفسير إنتاج مكونات الحياة في بركة أو محيط دافئين على سطح الكوكب لاتزال تحتفظ ببعض الموالين المعتقدين بها. وحديثاً نقل بعض العلماء موقع (قدْر الحساء) Soup Pot إلى قاع البحر، فهم يميلون إلى الاعتقاد بأن احتمال أن تكون الغيوم الضبابية المتشكلة من المعادن التي تقذفها الينابيع الحارة قد أدت إلى تشكل طلائع جزيئات الحياة. ولكن مجموعة متنامية من الباحثين الآخرين تتفحص مصدراً مختلفاً كلياً للجزيئات المانحة للحياة، ألا وهو الفضاء.

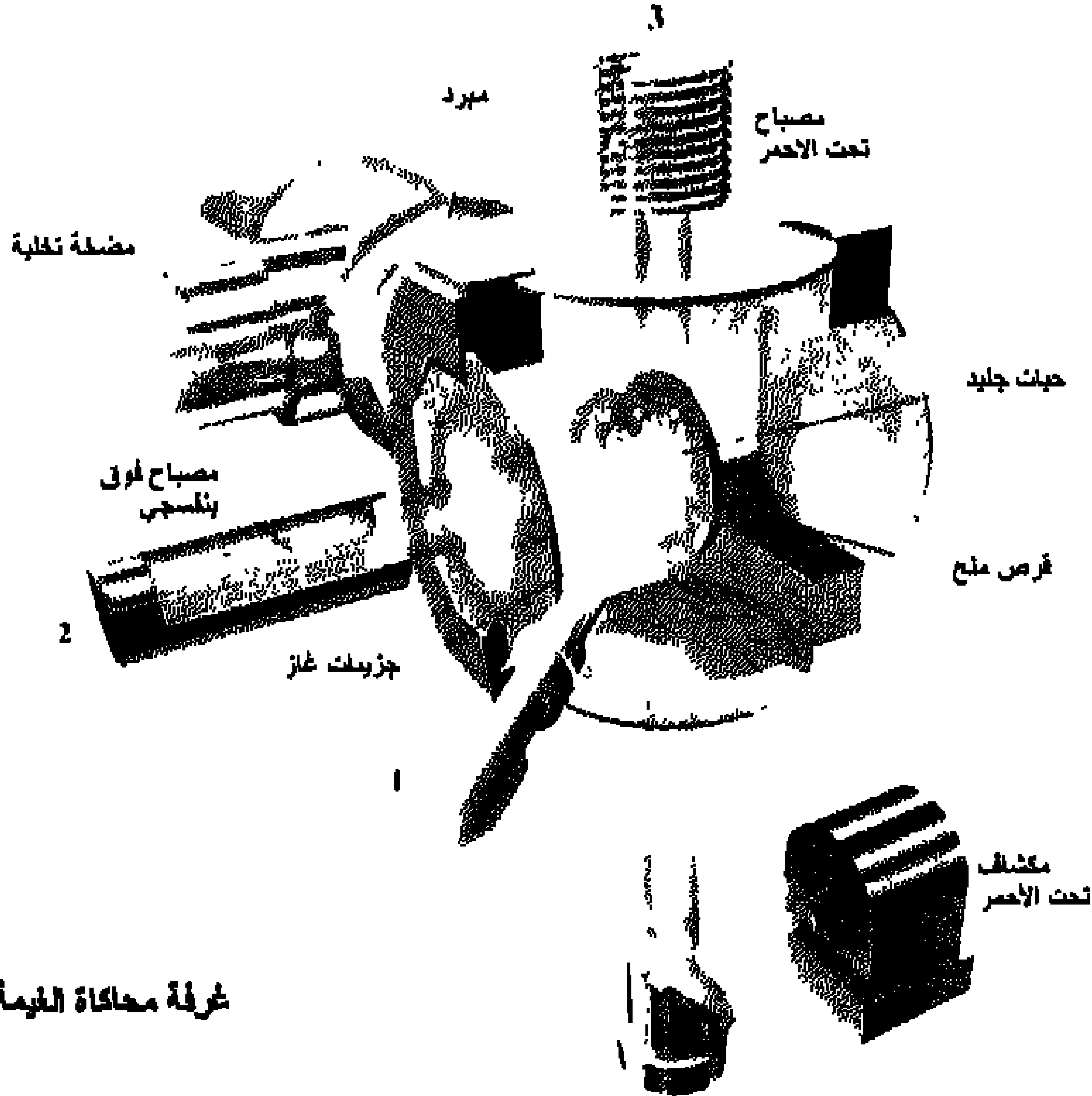
كانت (ج. أورو) [من جامعة هيوستن] أول من اقترح نظرية المصدر غير الأرضي للحياة. وذلك في عام 1961. وقد أحيا (س. شانك) [من ناسا في إيمس] هذه النظرية في عام 1979. ومنذ عام 1990 كان (س.ر. تشيبا) [من معهد البحث عن الحياة العاقلة غير الأرضية (SETI) في كاليفورنيا] المدافع الأول عن الفكرة القائلة بأن المذنبات والنيازك الصغيرة وجسيمات الغبار بين النجوم هي التي جلبت ماء كوكب الأرض وغازاته الجوية من الفضاء.

لا يتفق جميع العلماء بشأن الطريقة التي نشأت بها المحيطات على الأرض، ولكن معظمهم يجمع على إسهام حطام الفضاء في هذا الشأن، إذ يقدر أن مئات الأطنان من الغبار تنجرف كل يوم إلى سطح الأرض من الفضاء. إن هذه الحبيبات الدقيقة — لا يتجاوز أكبرها حجم حبة رمل — تتبعثر في المنظومة الشمسية الداخلية وتمر أحياناً متوهجة في سماء الليل كالشهب. وتبين الأدلة المتنامية أن المذنبات وأبناء عمومتها، إضافة إلى قيامها بنقل الماء والغازات التي جعلت كوكب الأرض صالحاً للسكنى، قد أمطرت الحساء البدائي بجزيئات عضوية مسبقة الصنع من النوع المشاهد اليوم في المنظومات الحية.

كشفت المراقبات الحديثة للمذنبات الشهيرة، مثل هالي وهيل — بوب وهاياكوتاكي، أن تلك الزائرات الجليدية زاخرة بالمركبات العضوية. وفي عام 1986 التقطت آلات التصوير على متن المركبتين الفضائيتين كيوتو وفيكا صوراً لمادة صلبة على سطح المذنب هالي تماثل الكيروجين الشبيه بالفحم والموجود في بعض النيازك. وقد استطاعت (مطاييف الكتلة) Mass Spectrometers أن تظهر وجود أثر لجزيئات غنية بالكربون. وحديثاً جداً استطاعت (المقاريب) Telescopes الأرضية، التي تتحرى لب المذنبين هاياكوتاكي وهيل — بوب وذيليهما، أن تبين وجود عدد من المركبات العضوية المحددة ومن ضمنها الميثان والإيثان. وفي العشرين سنة القادمة سوف يقوم عدد من المسابير الفضائية باستكشاف مذنبات أخرى.

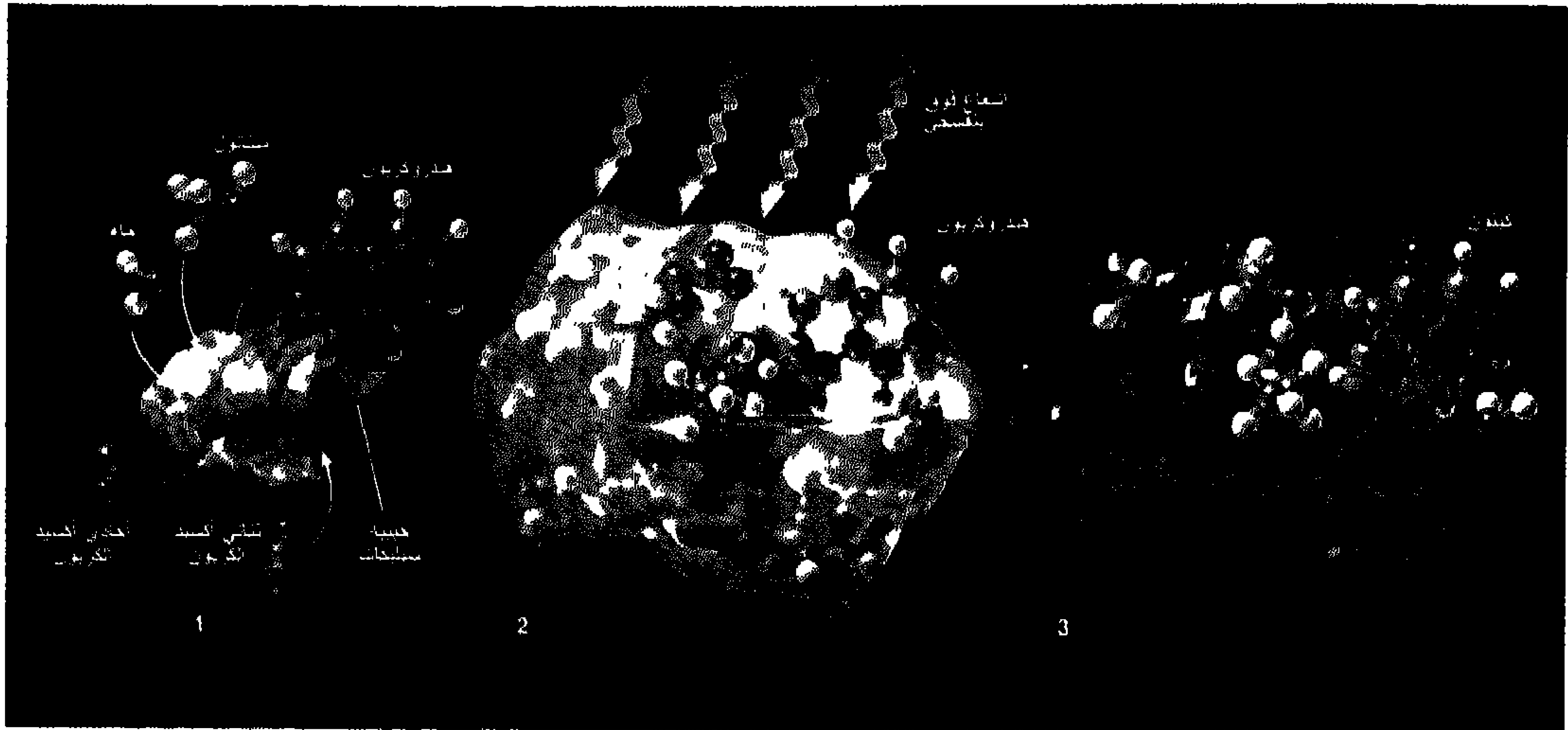


السديم النسر



غرفة محاكاة الغيمة

تقلد المحاكيات المختبرية ما يحدث في الأجزاء الباردة من الغيوم بين النجوم مثل السديم النسر (في الأعلى). فثمة مُبرِّد خاص ومضخة في داخل غرفة معدنية لها حجم علبة أحذية (في الأسفل)، يُولِّدان فضاء خلائياً درجة حرارته دون الصفر. يُرذُّ داخل الغرفة سديم من جزيئات غاز بسيط بوساطة أنبوب نحاسي فيتجمد فوق قرص ملح يقوم بدور اللب السيليكاتي لحبة الجليد في الفضاء (1). يقوم مصباح فوق بنفسجي بغمر الجليد الحديث التشكل بجرعة قوية من إشعاع شبيه بإشعاع النجوم (2) . وكذلك يسلط الضوء تحت الأحمر الذي يصدر عن النجوم أيضاً على الجليد لمعرفة ماهية الجزيئات المتجمدة في داخله (3). تكشف مقارنة طيوف امتصاص تحت الأحمر أن تركيب الجليد المختبري يشبه بصورة مذهلة تركيب جليد الغيوم.



يبدأ الجليد بين النجوم بالتشكل عندما تتجمد جزيئات مثل الماء والميثانول وأحد الهيدروكربونات على حبيبة من السيليكات تشبه الرمل تنجرف في الغيوم بين النجوم الكثيفة (1). تكسر الأشعة فوق البنفسجية الصادرة عن نجوم قريبة بعض الروابط الكيميائية للمركبات المتجمدة، في الوقت الذي تنمو فيه حبة الجليد إلى ما لا يزيد قطرياً على جزء واحد من عشرة آلاف جزء من المليمتر (2). وتتحد الجزيئات المتحطمة مكونة مركبات جديدة مثل الكينونات التي لا يمكن أن تتكون لو كانت الشظايا حرة الحركة بحيث تطفو بعيداً (3).

عندما يمر مذنب ضمن المنظومة الشمسية الداخلية الدافئة، يغلي قسم منه متحولاً إلى غاز وغبار، ينتقل بعضه إلى الأرض فيما بعد (جذبها التثاقلي) Gravitational Pull وقد استطاع علماء ناسا اقتناص جسيمات المذنبات من الجو الأعلى باستخدام الطائرات ER2 التي ترتفع إلى ما يعادل ضعف ارتفاع الطائرات النفاثة التجارية، حيث يلتصق الغبار الفضائي عند ارتفاع 62000 قدم (18.6 كيلومتر) بصفائح بلاستيكية مطلية بالزيت موضوعة داخل مجمعات موجودة تحت جناحي الطائرة. وقد وجد أحدنا (ساندفورد) مع باحثين آخرين حللوا هذه الجسيمات المجهرية أن بعضها يحتوي على ما يصل إلى نحو 50 في المئة من الكربون العضوي؛ وهذه النسبة أكبر مما وجد في أي شيء غير أرضي معروف. ولو سلمنا أن الغبار الفضائي يحتوي على 10 في المئة من الكربون في المتوسط فإنه عندئذ ينقل نحو 30 طناً من المواد العضوية إلى الأرض كل يوم.

ويمكن دراسة وفهم القطع الكبيرة من الكويكبات التي تفد إلى الأرض على شكل نيازك بسهولة أكبر من دراسة المذنبات البعيدة والغبار المجهري. وتتكون معظم النيازك من المعدن والصخر، ولكن بعضها يحتوي أيضاً على مركبات مثل (القواعد «الأسس» النووية) Nucleobases والكيتونات والكينونات والأحماض الكربوكسيلية والأمينات والأميدات. ومن بين العدد الوافر من المركبات العضوية المعقدة التي استخلصت من النيازك تركز الاهتمام على 70 نوعاً من الأحماض الأمينية فقط علماً أن ثمانية من هذه الأحماض الأمينية فقط تندرج ضمن مجموعة العشرين حمضاً التي تستخدمها الخلايا الحية لصنع البروتينات. ولكن هذه الأحماض ذات الأصل غير الأرضي تنتظم فيها سمة الحياة الأرضية.

فالأحماض الأمينية توجد في أزواج أحدها صورة مرآوية للآخر. وهذه صفة جزيئية تدعى (التخايل) Chirality. ومثلما أن يدي المرء تبدوان متطابقتين تماماً إذا وضعت راحة إحدى اليدين على راحة اليد الأخرى، وغير متطابقتين إذا وضعت راحة إحدى اليدين على ظاهر اليد الأخرى، فإن الأحماض الأمينية المفردة هي إما (يسارية) Left-handed أو (يمينية) Right-Handed. ولأسباب لا نعرف عنها إلا القليل، وفيما عدا حالات استثنائية نادرة. لا تكون الأحماض الأمينية في المتعضيات (الكائنات الحية) إلا من الأنواع اليسارية. إن أحد الانتقادات التي وجّهت لتجارب من نمط تجربة ميلّر هو أنها تنتج أعداد متساوية من شكلي الأحماض الأمينية كليهما. وفي هذا الأمر بالذات، تتفوق الأحماض الأمينية غير الأرضية. فلقد بين (ج.ر. كرونين) (من جامعة ولاية أريزونا) منذ قدّم تقريره الأول عام 1993، أن هناك رجوحاً طفيفاً للنوع اليساري في عدة أحماض أمينية استخلصت من نيزكين مختلفين. وعلى الرغم من اعتقاد بعض الباحثين أن يسارية الحياة أمر حصل مصادفة فمن المحتمل أن المكونات البدئية غير الأرضية قد حددت مسبقاً هذا التميز الجزيئي.

وعلى الرغم من أن الأحماض الأمينية قد تكوّن الجزيئات الكربونية الأكثر صلة بالحياة في النيازك، فإنها ليست الأكثر وفرة فيها، فمعظم الكربون الموجود يكون متحداً على شكل

مواد أولية أو حياة حقيقية ؟

ثمة بون شاسع بين فكرة أن مواد الحياة الأولية وصلت إلى الأرض عن طريق مذنبات ونيازك وبين فكرة أن المتعضيات الحية انجرفت إلى الأرض من الفضاء مستعمرة إياها ــ والفكرة الأخيرة هذه قديمة تعرف باسم شمولية التكاثر[2] Panspermia. فبعد أن كشف الطبيب الإيطالي (ف. ريدي) في القرن السابع عشر، زيف الاعتقادات التي سادت مدة طويلة من الزمن والقائلة بأن الحياة تتولد من مادة غير حية، ساد الافتراض أن الحياة لا يمكن أن تتولد إلا من الحياة. وباتباع هذا المنطق، اقترح الكيميائي السويدي (س.أ. أرهينيوس) في عام 1908 (الحائز جائزة نوبل)، أن الإشعاع الصادر عن النجوم قادر على نقل مكروبات مجهرية من عالم إلى آخر.

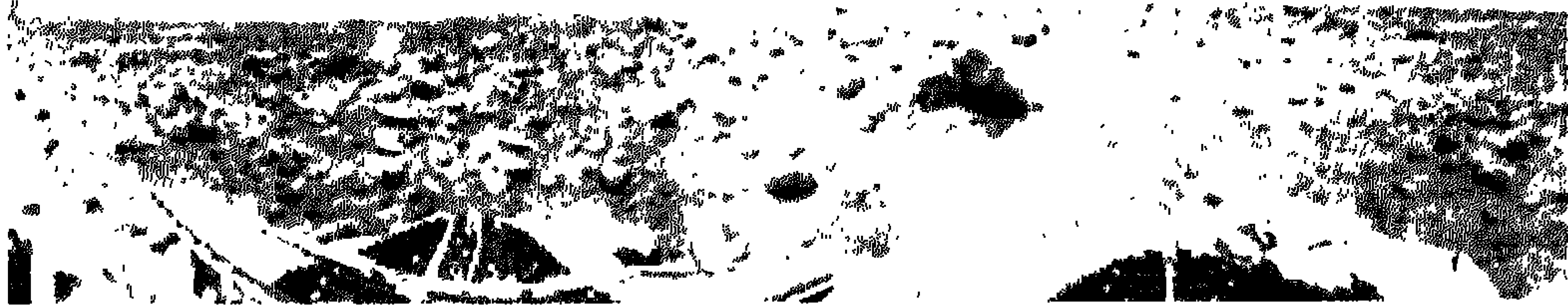
ومنذ ذلك الوقت لم تقم سوى قلة من العلماء الآخرين بإنعام النظر في هذه الفرضية في الاستعمار غير الأرضي. أما حديثاً، في عام 1996، فقد أحيت التقارير المثيرة للجدل بشأن المكروبات الأحفورية في النيزك المريخي ALH 84001 نظرية شمولية التكاثر. وقد بين تقرير صدر في العام ذاته أن الكواكب الداخلية في المنظومة الشمسية ربما تبادلت فيما بينها أطناناً من الركام خلال بلايين السنين القليلة الماضية، ومع ذلك فهناك بعض العلماء الذين مازالوا يشكون في أن تكون الحياة قد نشأت على المريخ في أي وقت من الأوقات، ناهيك عن الشك في قدرة المتعضيات (الكائنات) المريخية على البَقْيا Survival أثناء رحلتها نحو الأرض البالغة 80 مليون كيلومتر. وبفرض أن المكروب استطاع تحمل الصدمة التي قذفت به إلى الفضاء، فمن المؤكد أن الإشعاع المميت والخلاء في درجات حرارة دون الصفر ــ اللذين سيصادفانه في رحلته التي ستستغرق آلاف السنين ــ سيقضيان عليه.

وفي ضوء ما ذكرناه يبدو أن مسألة الاستعمار الوافد من المريخ معقدة بصورة غير ضرورية، مادام يمكن للحياة أن تكون قد نشأت هنا على الأرض، وكذلك يمكن أن تكون الحياة قد نشأت على المريخ بصورة مستقلة إذا كانت الظروف هناك مواتية لنشوء الحياة في أي وقت من الماضي السحيق. إضافة إلى أن المذنبات والنيازك التي مدت الأرض بالماء والجزيئات العضوية لابد وأن تكون قد قدمت خدمات مشابهة لجميع كواكب المنظومة الشمسية.

وبغية البحث عن دلائل على الحياة في التربة المريخية، تعتزم ناسا سبر هذه التربة باستخدام مسبار جديد. ومع ذلك، فحتى لو تبين أن هناك حياة على الكوكب الأحمر فإن البرهان على أن متعضياته استطاعت البَقْيا أثناء رحلتها من كوكبها والاستقرار على الأرض يبقى مسألة فيها نظر.

---

[2] فكرة طُرحت في القرن التاسع عشر تقول بأن الكون مليء بالمكروبات والأبواغ التي تتنامى حينما تصادف بيئة ملائمة.



منظر طبيعي عام للمريخ سنة 1997

(كيروجين) Kerogen، وهي مادة تتألف جزئياً من هيدروكربونات عطرية متعددة الحلقات، وهي مركبات تعرف على الأرض باسم الملوثات المسرطنة. وتنتج هذه المركبات من الاحتراق، لذا فهي تصادف في (السخام) Soot والهمبركر المشوي وغازات عوادم السيارات. وقد أثارت هذه الهيدروكربونات الخاصة ضجة عندما اكتشفت في النيزك المريخي ALH 84001 المثير للجدل والذي يعتقد بعض الباحثين أنه يحوي دليلاً على وجود مكروبات مريخية أحفورية (مستحاثية).

صندوق جليد أو عاصفة نارية؟

وعلى الرغم من وضوح مسؤولية المذنبات والنيازك والغبار الفضائي عن نقل الجزيئات المثيرة للاهتمام إلى الأرض، فإن معرفة المكان الذي تشكلت فيه هذه الجزيئات مازالت مسألة صعبة المنال. اقترح بعض العلماء أن تكون التفاعلات، التي تحدث في الماء الذي يسيل شحيحاً في المذنبات أو في كويكبات بعض النيازك، مسؤولة جزئياً عما تحويه من وفرة في المركبات العضوية، ولكن من الصعب أن تفسر هذه التفاعلات سبب وجود الجزيئات الكربونية المتجمدة في الغيوم المظلمة الممتدة بين النجوم.

ويزداد عدد العلماء الذين يعتقدون بأن جليد المذنبات هو من مخلفات الغيمة المظلمة التي انهارت مشكلة سديماً شمسياً نارياً، أي قرصاً مُدوِّماً من غاز وغبار أدى إلى ولادة الشمس والكواكب. وبقي الجليد على حاله من دون تغيير لأنه محمي بدرجات الحرارة المنخفضة جداً عند تخوم المنظومة الشمسية. ولكن لايزال هناك بعض العلماء الذين يدافعون عن الادعاء القديم بأن الجزيئات غير الأرضية تشكلت ضمن السديم. وتدعي هذه النظرية بأن الجليد الناجم عن الغيمة الأم قد تبخر وأن الجزيئات قد تحطمت وتفككت ومن ثم أعيد ترتيبها إبان ثورة تشكل الكواكب.

إن الجزيئات التي خضعت للمعاناة في السديم الشمسي ولم تتجمد على هيئة مذنبات إلا فيما بعد وهي التي يجب أن تحمل

(البصمات النظائرية) Isotopic Signatures الشائعة في كواكب المنظومة الشمسية الداخلية وأجرامها الأخرى. وعلى عكس ذلك، فإن معظم غبار المذنبات يكون غنياً (بالعناصر النادرة) Rare Elements، مثل الدوتريوم (وهو نظير للهيدروجين يحتوي على بروتون زائد واحد). إن الغنى بالدوتريوم صفة مميزة للتفاعلات الكيميائية التي تحدث في أوساط منخفضة الحرارة في الفضاء بين النجوم. ففي تلك المناطق من الفضاء التي تتراوح فيها درجة الحرارة حول الصفر المطلق (273°- سيلزية) لا يوجد من الطاقة سوى ما يكفي لاستبعاد القليل من الجزيئات المكونة من النظائر الأثقل، لذا تتراكم هذه الجزيئات الثقيلة مع مرور الزمن.

إن الأصل الحقيقي لمعظم المذنبات والنيازك يكاد يجمع بالتأكيد ما بين (الصندوق الجليدي بين النجوم النقي) Pure Intersteller Icebox و(العاصفة النارية السديمية) Nebular Firestorm. وتتجلى هذه الازدواجية في الغبار الفضائي الذي يتألف من مواد خضعت للتعديل بفعل حرارة شديدة إلى جانب مواد أخرى لم يلحق بها أي تغيير. وكذلك فإن ما تجمع من معلومات في السنتين اللتين أعقبتا رصد المذنبين هيل ــ بوب وهاياكوتاكي، دعّم الحالة المتعلقة بما ورثته المذنبات مما بين النجوم؛ إذ وجد العشرات من الباحثين تشابهاً مذهلاً بين جزيئات محددة ووفرة الدوتريوم في المذنبات وبين تلك الجزيئات التي توجد في العادة في حبات الجليد بين النجوم. أضف إلى ذلك أن (حالة سبين) Spin State ذرات الهيدروجين ــ وهي مقياس للأحوال التي خضع لها الجليد ــ في ماء المذنب هيل ــ بوب تبين أن الجليد تشكل في درجة تقدر بنحو 25 كلفن (400ــ درجة فرنهايتية أو 240ــ درجة سيلزية) ولم يسخن إلى درجة أعلى منها إطلاقاً.

إذا سلمنا بأن جليد المذنبات جاء من غيمة بين النجوم، فمن السهل أن نعتقد بأن الجزيئات العضوية جاءت أيضاً من هناك.

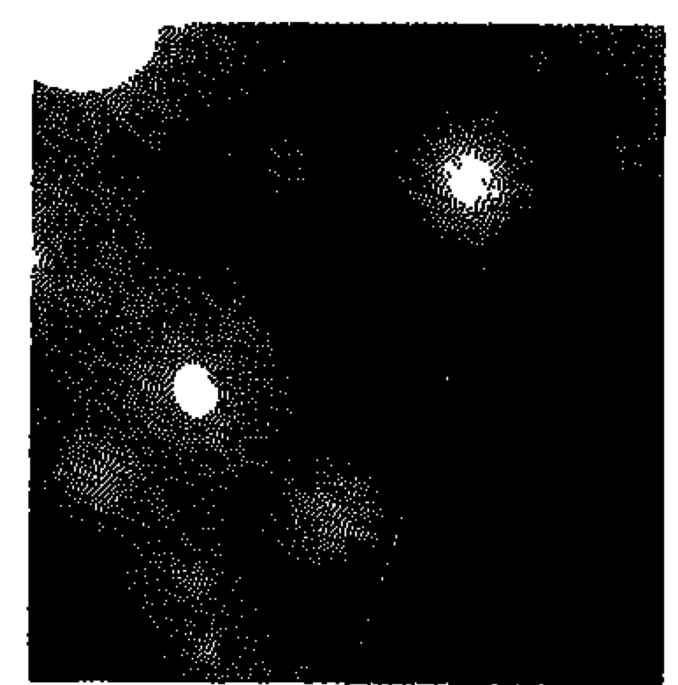
ويشاهد الفلكيون بصمات عدد كبير من المركبات العضوية في أرجاء الكون وبخاصة في الغيوم. لقد بينت الأبحاث التي استمرت عقداً من الزمن والتي قام بها أحدنا (الاماندولا) وآخرون غيره أن الهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات هي الطائفة الأكثر وفرة من المركبات الحاملة للكربون في الكون، وهي تحتجز في شباكها الجزيئية نحو 20 في المئة من الكربون الكلي الموجود في المجرة.

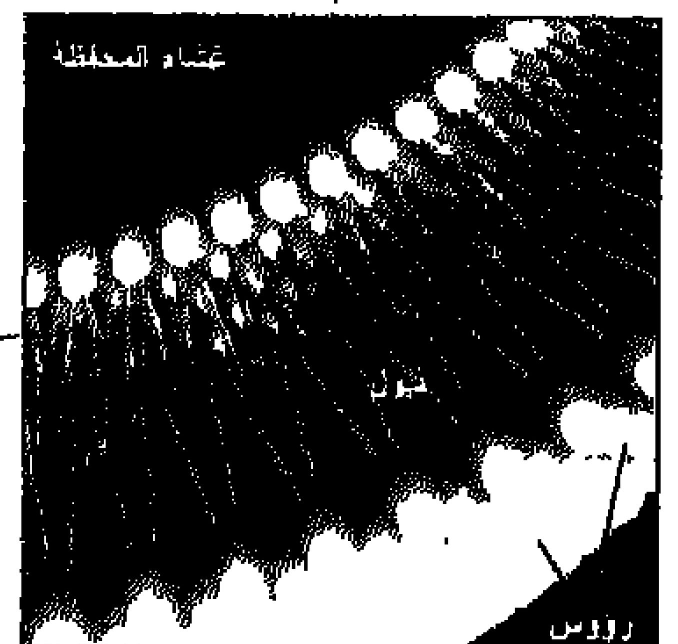
إن التوصل إلى استنتاج تركيب الجسيمات المجهرية للغبار والجليد الموجودين على بعد مئات السنين الضوئية أمر ممكن في بعض جوانبه عن طريق الرصد الفلكي للغيوم التي على شاكلة (السديم النسر) Eagle Nebula. فالغيوم المظلمة تمتص بعض الإشعاع تحت الأحمر من النجوم القريبة، وعندما يصل ما يتبقى من هذا الإشعاع إلى أجهزة الكشف الموجودة على الأرض ترسم طيفة. وهكذا فإن الضوء المفقود عند أطوال موجية محددة يدل على وجود روابط كيميائية معينة قادرة على امتصاص ذلك الضوء.

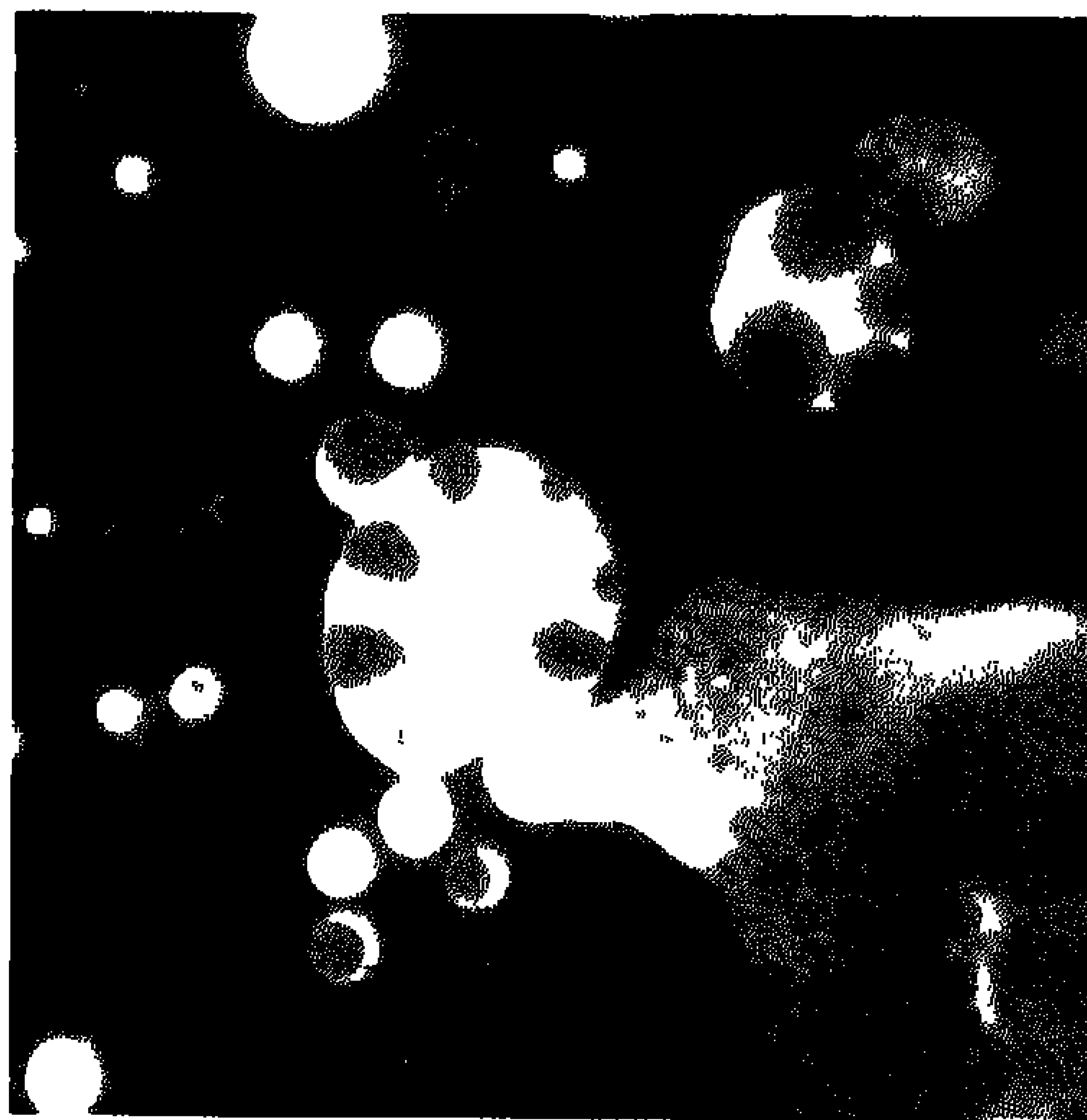
غيوم في المختبر:

لدى مقارنة طيوف تحت الأحمر للغيوم الموجودة في الفضاء بقياسات مشابهة أجريت على جليد مصنوع في المختبر يماثل الجليد بين النجوم، وجد فريقنا في (ناسا إيمس) وفرق أخرى في جميع أنحاء العالم، أن حبات الجليد في الغيوم المظلمة تجمدت حول (لبٍّ) Core من السيليكات أو الكربون. ويتألف الجليد أساساً من الماء ولكنه غالباً ما يحتوي على نحو 10 في المئة من جزيئات بسيطة أخرى مثل ثنائي أكسيد الكربون والميثان والميثانول والأمونيا.

وحاولنا فهم كيفية قيام هذه الجزيئات بين النجوم الوفيرة والبسيطة جداً، وهي في الجليد، بتفاعلات تحولها إلى تلك المركبات الأكثر تعقيداً الموجودة في النيازك. وهكذا قرر الاماندولا







هيدروكربونات من الفضاء، ربما تكون هي التي حمت جزيئات الحياة البدئية. وتنظم الهيدروكربونات المستخلصة من النيازك (الأخضر) والمركبات المشابهة المصنعة في المختبر في الظروف السائدة بين النجوم (الأزرق) نفسها على شكل محافظ راشحة عندما تمتزج بالماء. تتجه الرؤوس الهيدروفيلية للجزيئات، أي المحبة للماء، نحو خارج غشاء المحفظة في حين تبقى ذيولها الهيدروفوبية، أي الكارهة للماء (في أسفل اليمين) مندسة فيه. وتكون هذه الكرات متفلورة مما يدل على احتباس مركبات غنية بالكربون داخلها.

(وهو خبير في كيميائية درجات الحرارة المنخفضة) بناء غيمة بين النجوم في المختبر.

لقد قامت أجهزة التبريد والمضخات بتوليد خلاء فضائي قارس البرودة، ضمن غرفة معدنية طول ضلعها 20 سنتيمتراً، ونشر في جو تلك الغرفة ضباب من جزيئات غازية بسيطة بوساطة أنبوب من النحاس ليتجمد على قرص من الألمنيوم أو يوديد السيزيوم بحجم حبة الجوز، إذ يقوم هذا القرص بدور اللب في جسيم الغبار الفضائي. ولكي يحاكي وسط الغيمة الممتدة بين النجوم محاكاة كاملة قام ألاماندولا بوضع مصباح ضوء فوق بنفسجي لتسليط إشعاع شبيه بإشعاع النجوم على جو الغرفة.

لقد بينت تجاربنا أن الأشعة فوق البنفسجية تستطيع، حتى في تلك الحالات المتدنية جداً من درجات الحرارة والضغط والمكافئة لما هو موجود في الفضاء، أن تكسر الروابط الكيميائية كما تفعل تماماً في جو الأرض. إن هذا الإشعاع هو المسؤول عن كسر الروابط الكيميائية في مركبات مثل كلوروفلوروالكربون، فتقوم الذرات المتحررة من هذا الفعل بمهاجمة جزيئات الأوزون الواقية التي تمنع هذا الإشعاع من (شيّ) Baking كوكب الأرض.

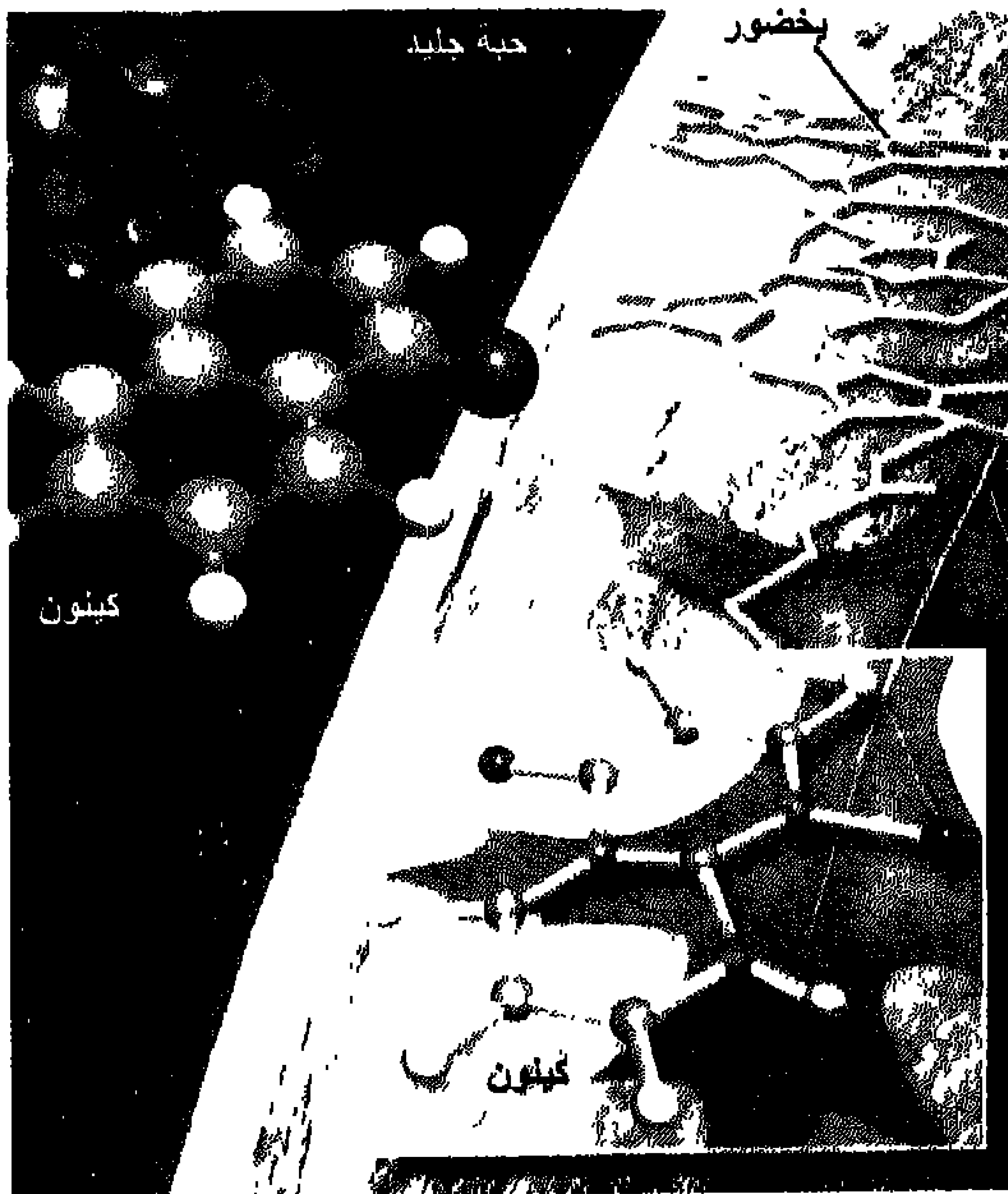
إن سيرورة كسر الروابط هذه عندما تحدث في الفضاء، حيث تكون الذرات محتجزة ضمن الجليد، تستطيع أن تتيح المجال للشظايا الجزيئية كي تتحد من جديد معطية بنى معقدة غير اعتيادية، الأمر الذي لا يمكن أن يحدث لو كانت هذه الشظايا حرة في التحرك أنى تشاء. وتتشكل هذه المركبات المعقدة في جميع أرجاء الفضاء التي تصادف فيها حبات الجليد، وبخاصة في المناطق الغنية بالأشعة فوق البنفسجية حول النجوم الفتية. وفي غرفة الغيوم التي صنعناها قمنا بغمر حبة الجليد النامية بكمية من الإشعاع تعادل ما يصيب حبة فضائية على مدى عدة آلاف من السنين.

وعندما بدأ أحدنا (بيرنشتاين) بجليد بسيط مؤلف من الماء والميثانول والأمونيا ــ بالنسب ذاتها الموجودة في الجليد الفضائي ــ أنتجت تجربته مركبات معقدة مثل الكيتونات والنتريلات والإيثرات والكحولات التي وجدت في النيازك الغنية بالكربون، كما استطعنا توليد سداسي ــ ميثيلين ــ رباعي أمين (HMT)، وهو جزيء يتألف من ست ذرات كربون ويعرف عنه أنه ينتج الأحماض الأمينية في الماء الحمضي الدافئ. وكذلك ظهرت في مزيجنا جزيئات تحوي ما يصل إلى 15 رابطة كربونية.

وأظهرت بعض هذه المركبات صفات غريبة قد يُرجَع إليها أمر إيواء فعاليات الحياة الأولى. ولقد وجد (د.و. ديمر) (وهو كيميائي من جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز) أن بعض الجزيئات في حبات الجليد الموجود في غرفة الغيوم تشكل نقيطات تشبه (المحفظة) Capsule في الماء. وتشبه هذه المحافظ إلى حد بعيد تلك التي حصل عليها قبل عشر سنوات عندما استخدم مستخلصات النيازك من مورتشيسون في أستراليا. وعندما قام ديمر بمزج المركبات العضوية التي حصل عليها من النيازك بالماء، وجد أنها تتجمع آنياً في بنى كروية الشكل تشبه أغشية الخلايا. وقد بين أحد زملائنا وهو (ج. دوركين) أن هذه المحافظ تتألف من مجموعة من الجزيئات العضوية المعقدة.

ولكي يحدث مثل هذا التنظيم الذاتي يجب أن تكون الجزيئات عادة مؤلفة من اثنتي عشرة ذرة من الكربون أو أكثر، ويجب أن تكون (أمفيفيلية) Amphiphilic، وهذا يعني أن رؤوسها الهيدروفيلية ــ أي المحبة للماء ــ ينبغي أن تصطف في مواجهة جزيئات الماء في حين تبقى ذيولها الهيدروفوبية ــ أي الكارهة للماء ــ مندسة داخل الغشاء. ويلاحظ كذلك أن الفقاعات التي يُحصل عليها من مستخلص النيازك أو غرفة الغيوم تكون (متفلورة) Fluoresce، مما يدل على أن هناك مادة عضوية إضافية محتجزة في الداخل.

ولعل أكثر المركبات أهمية من الناحية البيولوجية، من بين جميع المركبات التي أنتجناها، هي تلك التي حصلنا عليها عندما بدأنا بجليد مائي يحوي هيدروكربونات عطرية متعددة الحلقات، مثل تلك التي تتوافر في الغيوم الفضائية. تتحول هذه الهيدروكربونات، عندما تخضع لشروط تماثل الشروط بين النجوم، إلى العديد من مكونات النيازك الغنية بالكربون، بما فيها الكحولات الأكثر تعقيداً والإيثرات، وربما الأكثر أهمية من ذلك (الكينونات) Quinones؛ إذ يمكن لهذه الأخيرة ــ التي لا تخلو منها منظومة حية



كينونات من الفضاء لها بنى تماثل تلك التي تساعد جزيئات اليخضور (الكلوروفيل) على نقل طاقة الضوء من أحد أقسام الخلية النباتية إلى قسم آخر.

اليوم ــ الحفاظ على استقرار الإلكترونات (غير المقترنة «غير المتزاوجة» Unpaired)، وهي مقدرة تحتاج إليها الخلايا الحية في إنجاز مختلف فعاليات نقل الطاقة. فالكينونات مثلاً هي المكونات الفعالة في نباتي (الصبّار) Aloe و(الحناء) Henna.

إن المقدرة على نقل الإلكترونات التي تتصف بها هذه الجزيئات العديدة الاستعمالات تؤدي دوراً أساسياً في تحويل الضوء إلى طاقة كيميائية في (عملية البناء «التركيب» الضوئي) Photosynthesis. إن هذه المقدرة تبدو أكثر إثارة للاهتمام في إطار سيناريو نشأة الحياة على الأرض، وذلك إذا ما قُرنت بمقدرة الكينونات على امتصاص الإشعاع فوق البنفسجي ــ وهو الخطر المميت الذي يحيق بجزيئات سهلة العطب مثل الأحماض الأمينية. وقد تكون الكينونات غير الأرضية هي التي قامت بدور الدرع الواقية للأرض قبل تطور طبقة الأوزون الحالية. إضافة إلى أنها قد تكون هي الجزيئات التي استعملتها أشكال الحياة الأولى على الأرض لاقتناص الضوء بغية استخدامه في أشكال بدائية من عملية البناء الضوئي.

من الجزيئات إلى الحياة:

لقد أتاحت لنا التجارب المختبرية والمراقبات الفلكية معرفة أن الظروف السائدة في الفضاء السحيق والتي تبدو عقيمة قاحلة، تولد مركبات عضوية معقدة تحملها النيازك والغبار الفضائي إلينا حتى الوقت الحاضر. إن إعادة التفكير في مسألة نشوء الحياة في ضوء هذه المعلومات تجعلنا نتوصل إلى أن قدوم الأحماض الأمينية والكينونات والجزيئات الأمفيفيلية ومركبات عضوية غير أرضية أخرى قد يكون السبب في ازدهار الحياة أو على الأقل في تسهيل نمائها. وربما تكون الأحماض الأمينية غير الأرضية هي التي قامت ببناء البروتينات الأولى، وربما أعطت الجزيئات الأمفيفيلية للكينونات المقدرة على استغلال الضوء. ولكن الأدوار الدقيقة التي أدتها هذه المركبات العضوية ليست معروفة تماماً. لذا قد تكون المركبات العضوية غير الأرضية مجرد مواد بدئية لتفاعلات كيميائية أعطت جزيئات مختلفة تماماً.

يمكن للمرء أن يتصور أن جزيئاً سقط من السماء كان قادراً على إحداث تفاعل كيميائي بسيط أو تسريعه، وأن هذا التفاعل كان أساسياً لنشوء الحياة الأولى. وإذا كانت جزيئات الحياة البدئية قد ارتبط بعضها ببعض في الحساء البدائي، فإن الأحماض الأمينية الفضائية ربما تكون قدمت الكميات الضرورية لحدوث التفاعل. وبصورة مشابهة فإن أحداث بناء الحياة في قاع البحر ربما تضمنت مكونات من مركبات غير أرضية كانت تنهمر على المحيط من الفضاء. ولما كانت هذه المكونات قادرة على إنجاز كيمياء الحياة بكفاءة أكبر، لذا فقد يكون وجودها منح ميزة تطورية. ومع مرور الزمن، صار ذلك التفاعل البسيط مدفوناً في عمق ما ندعوه اليوم تفاعلاً كيميائياً حيوياً منظّماً بالبروتين.

وبالطبع، لا تزال هناك هوة سحيقة تفصل ما بين أشد المركبات العضوية تعقيداً والكود الوراثي والاستقلاب (الأيض) والتناسخ الذاتي، وهي العناصر الضرورية لتعريف الحياة. ولكن بالنظر إلى وجودها في كل مكان، لو كان لهذه الجزيئات العضوية القادمة من الفضاء صلة بالحياة هنا على الأرض، فذلك يعني أنها كانت ــ ولا تزال ــ جاهزة لتقديم العون على نشوء الحياة في مكان آخر.

إن الإشارات التي تدل على وجود ظروف ملائمة للحياة على المريخ وتحت السطح الجليدي لقمر المشتري (يوروبا) Europa، توحي بأن هناك أمكنة أخرى في منظومتنا الشمسية قد تكون استفادت من الدفق غير الأرضي. وإذا ما أضفنا وجود الجزيئات العضوية المعقدة في كل مكان عبر الفضاء، إلى الاكتشافات الحديثة التي بينت وجود كواكب تدور حول نجوم أخرى، فمن المحتمل أن تكون الظروف المواتية للحياة، إن لم تكن الحياة ذاتها، قد ترسخت أيضاً في منظومات شمسية أخرى غير منظومتنا.

مهمات مذنباتية قيد الإنجاز	
ستاردست Stardust	أول عينة مذنبات من الفضاء السحيق سيقوم مسبار بالتحليق في الذؤابة Coma الغازية للمذنب وايلد 2 في عام 2004. وستستعمل مادة ذات أساس سيليكوني تدعى إيروجل لجمع عينات من الغبار وسوف تعيدها إلى الأرض في عام 2006. موعد الإطلاق: 1999/2/7 (ناسا)
التقانة الفضائية 4/ شامبوليون	أول نزول على مذنب سيرسل سائل يدور حول المذنب تيمبل1 مركبة صغيرة لتحط على نواة المذنب الصخرية في عام 2005. ستلتقط المركبة بعد نزولها صوراً وتحلل عينات تحت سطحية. موعد الإطلاق: 2003 (ناسا)
روسيتا Rosetta	أكثر دراسات المذنبات شمولية حتى الآن. سيتلاقى سائل مع المذنب ويرتانين في عام 2013 وسيبقى 11 شهراً في مداره يجري القياسات، في حين سيقوم مسبار سينزل على المذنب بتحري سطحه. موعد الإطلاق: 2003 (وكالة الفضاء الأوروبية)

المؤلفون

Max P. Bernstein, Scott A. Sandford and Louis J. Allamandola

يعملون في مختبر الكيمياء الفلكية بمركز أبحاث إيمس، بالإدارة القومية لعلوم الطيران والفضاء (ناسا) NASA، بيرنشتاين مقاول يعمل مع (ناسا إيمس) وعضو في معهد البحث عن الحياة العاقلة غير الأرضية في ماونتن فيو بكاليفورنيا. ويقوم بمحاكاة الكيمياء العضوية للمذنبات ولحبات الجليد بين النجوم والإنعام في صلتها بأصل الحياة. أما ساندفورد وألاماندولا فهما موظفان مدنيان في ناسا إيمس، حيث يقوم ساندفورد بعمل أصيل على جسيمات الغبار بين الكواكب (البينكوكبية)، وهو محرر مشارك في مجلة علوم النيازك والكواكب، كما أنه باحث مشارك في مهمة ناسا المسماة (ستار دست) Stardust. أما ألاماندولا فهو مؤسس ومدير مختبر إيمس للكيمياء الفلكية ويتمتع بخبرة عشرين سنة في الدراسات الرائدة عن جليد المنظومة الشمسية وبين النجوم، وهو واضع فرضية الهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات. ويمكنك التزود بالمزيد عن المؤلفين وأبحاثهم بالرجوع إلى صفحتهم على الإنترنت على العنوان: .hettp://web99.arc.nasa.gov/~astrochm

مراجع للاستزادة

THE ASTROCHEMICAL EVOLUTION OF THE INTERSTELLAR MEDIUM. Emma L.O. Bakes. Twin Press Astronomy Publishers, 1997.

COMETS AND THE ORIGIN AND EVOLUTION OF LIFE. Edited by Paul J. Thomas, Christopher F. Chyba and Christopher P. Mckay. Springer, 1997.

PASTURE, LIGHT AND LIFE. John Cronin in Physics World, Vol. 11, No. 10, Pages 23—24: Cctober 1998.

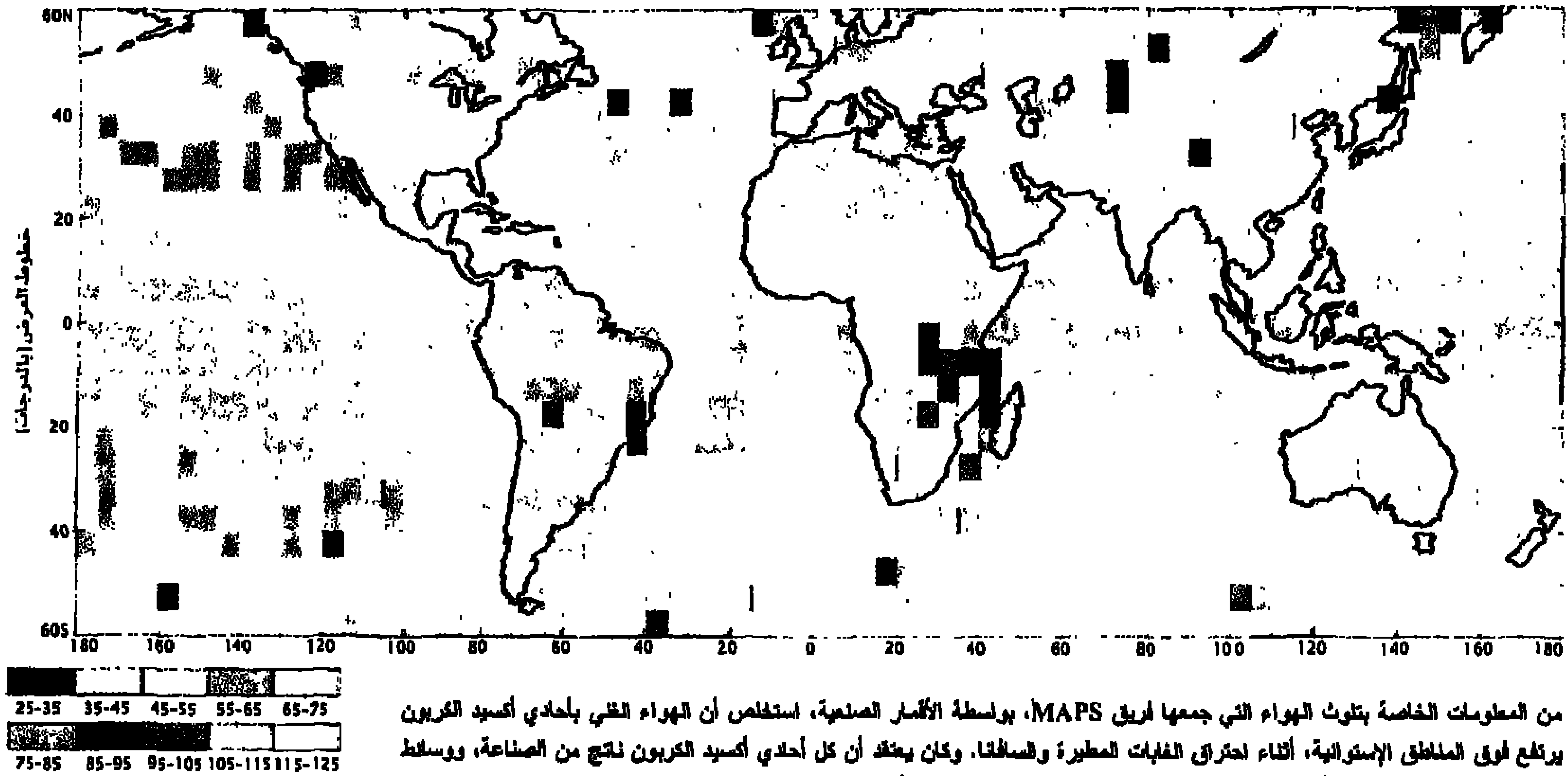
UV IRRADIATION OF POLYCYCLIC ARMATIC HYDROCARBONS IN ICES: PRODUCTION OF ALOCOHOLS, QUINONES, AND ETHERS. MAX P. Bernstein et al. In Science, Vol. 283, Pages 1135—1138; February 19,1999.



أحادي أكسيد الكربون والأرض المحترقة

بيّنت قياسات أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، التي أخذت من الفضاء، وجود مقادير كبيرة من ذلك الغاز في مناطق غير متوقعة. وتنافس حرائق المناطق الاستوائية وسائل النقل والصناعة كمصدر لأحادي أكسيد الكربون.

(ر.إ. نويل). (هــ.ج. ريشل جونير). (و. سايلر)



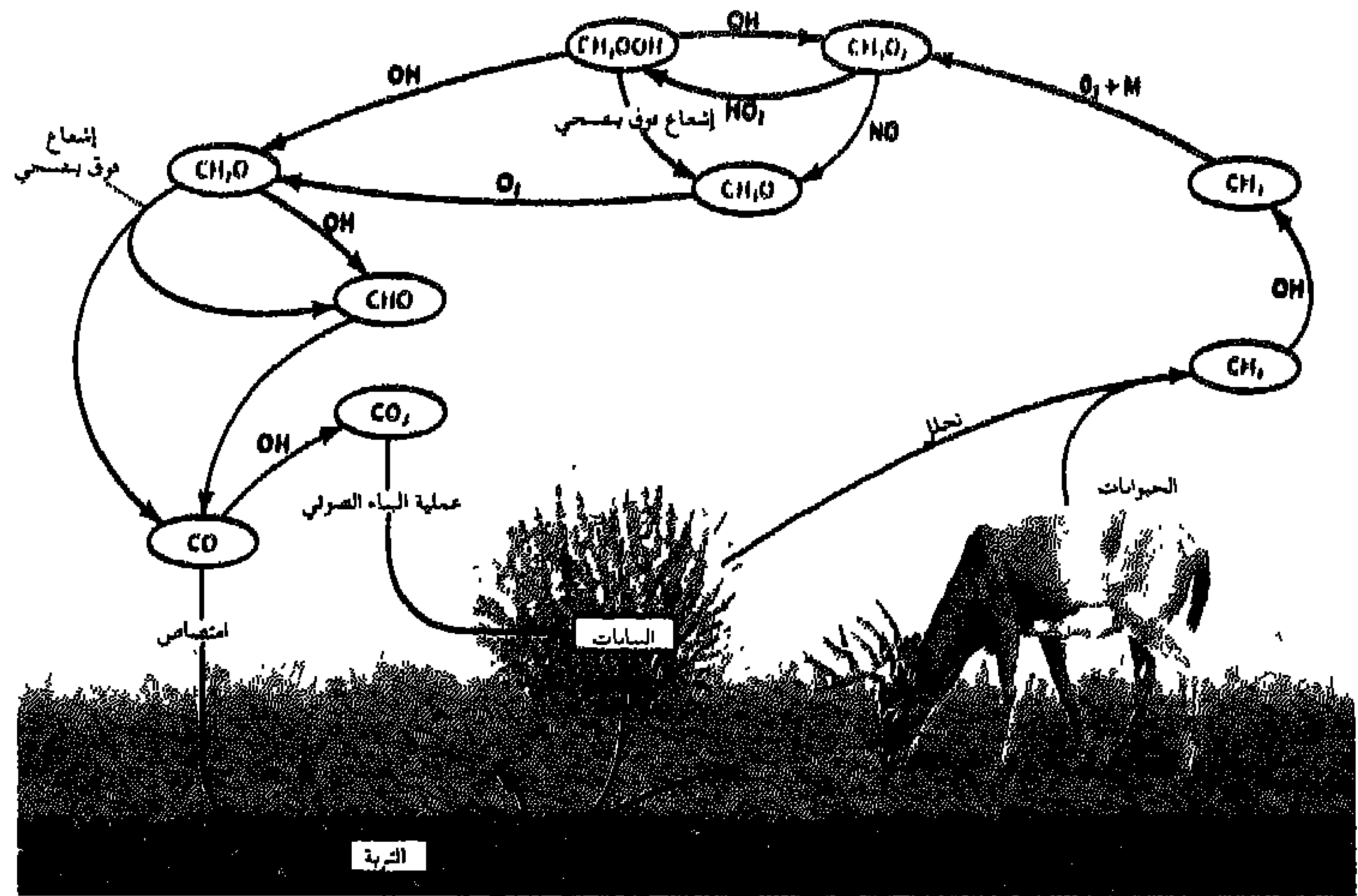
من المعلومات الخاصة بتلوث الهواء التي جمعها فريق MAPS، بواسطة الأقمار الصنعية، استخلص أن الهواء الغني بأحادي أكسيد الكربون يرتفع فوق المناطق الإستوائية، أثناء احتراق الغابات المطيرة والسافانا. وكان يعتقد أن كل أحادي أكسيد الكربون ناتج من الصناعة، ووسائط النقل. لكن تبين فيما بعد خطأ هذه الفكرة، اعتمادا على القياسات التي جرت في أكتوبر/تشرين الأول 1984، على متن مكوك الفضاء تشالنجر، بفضل معدات حساسة للأشعة تحت الحمراء. وبناء على ذلك رسمت هذه الخريطة التي تُشير إلى نسبة امتزاج أحادي أكسيد الكربون بالهواء على ارتفاعات واقعة بين 3 كيلومترات و 18 كيلومتراً. وقد انتقلت غمامات الغاز بفعل الرياح من مناطق نشأتها إلى مناطق أخرى، ويمثل كل مربع ملون 5 درجات عرض و5 درجات طول في كل جانب ويشير اللون إلى القيمة المتوسطة لعدة قياسات في المربع.

لو رُسمت خريطة منذ عشرين عاماً للغلاف الجوي تبين توزع أحادي أكسيد الكربون وتدفقه المفترضين، لوضعت معظم ذلك الغاز في النصف الشمالي للكرة الأرضية. فقد كان الخبراء متفقين على أن كل غاز أحادي أكسيد الكربون ينشأ فعلياً عن احتراق الوقود الأحفوري، وأن النصف الشمالي للكرة الأرضية هو موطن معظم صناعات العالم ووسائل النقل فيه. ولبينت تلك الخريطة أن كثيراً من ذلك الغاز يحوم قرب سطح الأرض، حيث ينشأ، في أدنى كيلومترين من الغلاف الجوي أو (الطبقة المحيطة بالأرض) Boundary Layor .

وقد يؤدي الحمل الحراري إلى انتقال بعض من ذلك الغاز إلى ارتفاعات أعلى ثم ينساب إلى النصف الجنوبي للكرة الأرضية، وفيما عدا ذلك فإن غاز أحادي أكسيد الكربون سيبقى في الشمال.

لا ريب في أن تلك الخريطة ستكون خاطئة؛ فأحزمة الدخان المتصاعدة من المصانع وأنابيب عوادم السيارات ليست المصدر الرئيسي الوحيد لأحادي أكسيد الكربون ولم تكن كذلك في يوم من الأيام.

بل ربما لم تكن أكبر مصدر لهذا الغاز العديم اللون والرائحة. لقد تمكنّا من تطوير جهاز وُضِع مرتين في الرحلات الجوية لمكوك الفضاء ــ زودنا (بلقطات) Snapshots لتوزع أحادي أكسيد الكربون على رقعة شاسعة من الأرض. إن قياسات هذا الجهاز، إضافة إلى المعلومات التي جمعتها الطائرات والمحطات الأرضية عبر السنوات العشر الماضية، بينت بوضوح أن احتراق الغابات الاستوائية المطيرة وحشائش السافانا تنتج قدراً من أحادي أكسيد الكربون مساوياً على الأقل لذلك القدر الناشئ عن احتراق الوقود الأحفوري.



يتكون أحادي أكسيد الكربون بشكل طبيعي في الغلاف الجوي، عبر سلسلة من التفاعلات التي تبدأ بأكسدة الميثان بجذر الهدروكسيل. إن جذور الهدروكسيل (OH) الناتجة من الإشعاعات الشمسية، تسهم في العديد من التفاعلات في دورة لتكوين أحادي أكسيد الكربون (CO)، مُحولة إياه إلى ثنائي أكسيد الكربون (CO_2). ويتنافس أحادي أكسيد الكربون مع غيره من الغازات للاتحاد بالهيدروكسيل. ومع ارتفاع تركيز أحادي أكسيد الكربون بسبب احتراق الغابات الاستوائية المطيرة وغيرها من العمليات، تزداد فرصة أحادي أكسيد الكربون للتفاعل مع مزيد من الهيدروكسيل.

وهذا الاكتشاف يُنذِرُ بالخطر، ولكن ليس لأن أحادي أكسيد الكربون غاز سام، بل لأنه يتحد بشدة مع هيموغلوبين الدم فيمنع الأكسجين من الوصول إلى الأنسجة. كما أن تركيز أحادي أكسيد الكربون الشائع في أنفاق المواصلات أو الشوارع المزدحمة، والبالغ 20000 جزيْء في كل بليون جزيء من الهواء، يمكن أن يعطِّل (حدة «صفاء» الذهن) Mental Acuity. ومع ذلك فإن تركيز أحادي أكسيد الكربون فوق الغابات الاستوائية المطيرة أقل بمئات المرات من التراكيز السامة. وبالمقابل فإن آثار من الغاز تُظْهِرُ تهديداً خطيراً على البيئة. فمن جهة أولى تؤكد النسب المرتفعة لأحادي أكسيد الكربون الناشئة عن إحراق (النابتة «الحياة النباتية») Vegetation إمكانية تدمير سريع لغابات المناطق الاستوائية المطيرة، ومن المحتمل أن يؤدي ذلك إلى تغيرات خطيرة في مناخ تلك الجهات وربما في مناخ بقية العالم. ومن جهة ثانية، سيشجع التزايد الواضح لأحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على تراكم غازات ملوِّثة للبيئة كالأوزون الذي له تأثير سام جداً على النباتات، والميثان الذي يؤدي إلى تفاقم ظاهرة (الجُنَّة «البيوت النباتية») Greenhouse، وبذلك قد يسهم في رفع درجة الحرارة العامة للكرة الأرضية.

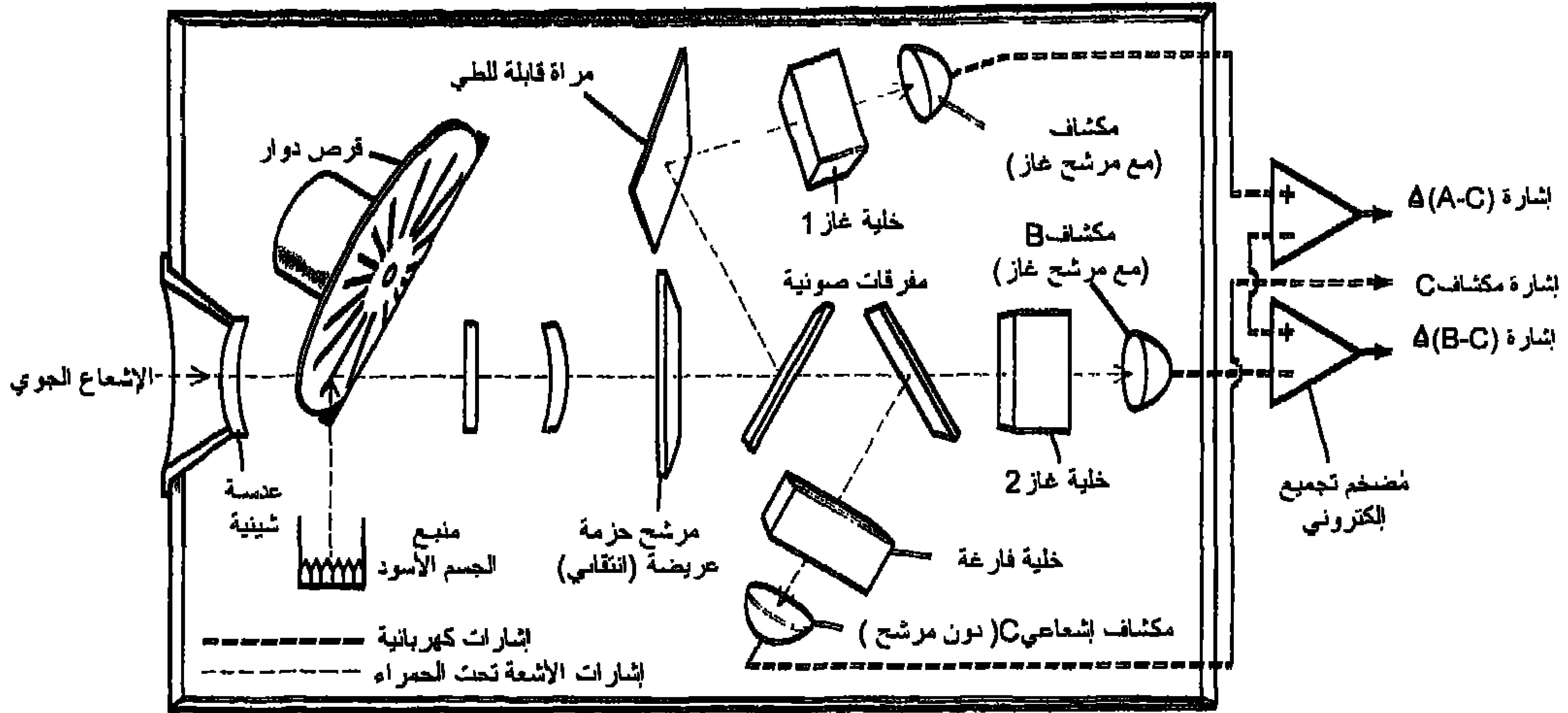
منذ عدة سنوات بدت التراكيز العالية لأحادي أكسيد الكربون في النصف الجنوبي للكرة الأرضية والمناطق الاستوائية، بعيدة الاحتمال، بسبب الاعتقاد بأن مصادر الغاز تقتصر على الصناعة والآلات المحركة في النصف الشمالي للكرة الأرضية. وحتى وقت قريب نسبياً فإن الدراسات عن أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، والتي أجريت عند مستوى سطح الأرض أو البحر، أيدت ذلك الاعتقاد. فعلى سبيل المثال أخذت في عام 1969 عينات من الهواء من قِبَلْ أحدنا (سايلر) Seiler ومعه (Ch. جونج) Christian Jung من معهد ماكس بلانك للكيمياء في (ماينز) Mainz، من على سطح سفينة كانت تجوب المنطقة الاستوائية في المحيط الأطلسي، وقد بينت وجود مقادير عالية من أحادي أكسيد الكربون شمال خط الاستواء، وخلال الفترة نفسها أخذت قياسات بواسطة طائرة كانت تطير بين فرانكفورت وجوهانسبرك على ارتفاع يبلغ نحو عشرة كيلومترات، بينت وجود تراكيز متماثلة تقريباً من أحادي أكسيد الكربون في كل من نصفي الكرة الأرضية الشمالي والجنوبي. وعزيت تلك النتائج إلى التمازج ذي الكفاءة العالية لهواء نصف الكرة الأرضية الشمالي مع هواء نصف الكرة الأرضية الجنوبي على ارتفاعات عالية.

] انظر: «الدورة الكونية للملوثات الجوية».

«The Global Circulation of Atmospheric,Pollutants,» by Reginald E. Newell; Scientific American, January, 1971].

ورغم ذلك فإن اكتشاف التراكيز العالية لأحادي أكسيد الكربون في النصف الجنوبي للكرة الأرضية، حفز التحريات عن مصادر أخرى محتملة غير احتراق الوقود الأحفوري. وكان أحد هذه المصادر التي استرعت الانتباه هو التفاعلات الكيميائية الجوية التي يتدخل فيها جذر الهدروكسيل (OH) الفعّال جداً. ينتج جذر الهدروكسيل من التفاعل بين جزيئات الماء في الجو، وبين ذرات الأكسجين المحرضة نتيجة تفكك الأوزون بفعل أشعة الشمس على ارتفاعات منخفضة. إن الفعالية العالية للهدروكسيد تجعل منه أهم (غاز منظف) Scavenging gas في الغلاف الجوي، حيث يؤكسد بشراهة (الميثان) Methane وغيره من الجزيئات.

في عام 1971 اقترح كل من (ج.س. ماك كونيل) James C. Mcconnel و(م.ب. ماكيلروي) Michael B. Mcelroy و(س.س. ووفسي) Stephen C. Wofsy من جامعة هارفارد، أنه عندما يُؤكسد الهيدروكسيد غاز الميثان في الغلاف الجوي، فإنه يطلق سلسلة من التفاعلات التي تُنْتِج كمية وفيرة من أحادي أكسيد الكربون. ويتوزع الميثان بتراكيز منتظمة تقريباً في الغلاف الجوي ولذا فهو موجود



تدخل الأشعة تحت الحمراء من الجو في مقياس الإشعاع (المكشاف الإشعاعي) في الـ MAPS، ويتم تقطيعها بواسطة عجلة دوارة ذات ثقوب تدخل ومضات الإشعاع من جسم أسود ساخن يُعد مرجعاً. ويوجد مرشح ضوئي يستبعد كافة الأطوال الموجية باستثناء تلك التي تقارب 4.67 ميكرومتر، وهي ذروة الحزمة الضوئية التي يمكن امتصاصها من أحادي أكسيد الكربون. وبواسطة عدة مرايا (صفائح نصف عاكسة) يوجه الشعاع المختار إلى ثلاثة من مكاشيف الإشعاع. ويوجد مكشاف الإشعاع دون مرشح خلف خلية غازية مفرغة ويقيس الشدة المطلقة للإشعاع. أما المكشافان الآخران فيقعان خلف خلايا مملوءة بأحادي أكسيد الكربون بضغوط مختلفة. ويسجل كل من نتائج المكشاف غير المرشح والفرق بين ناتجه ونواتج المكشافين المرشحين بهدف استخدامها لدراسات لاحقة.

بكثرة في النصف الجنوبي للكرة الأرضية، ووفقاً لحسابات مجموعة هارفارد يمكن أن يكون مصدراً لأحادي أكسيد الكربون أكثر أهمية من احتراق الوقود الأحفوري.

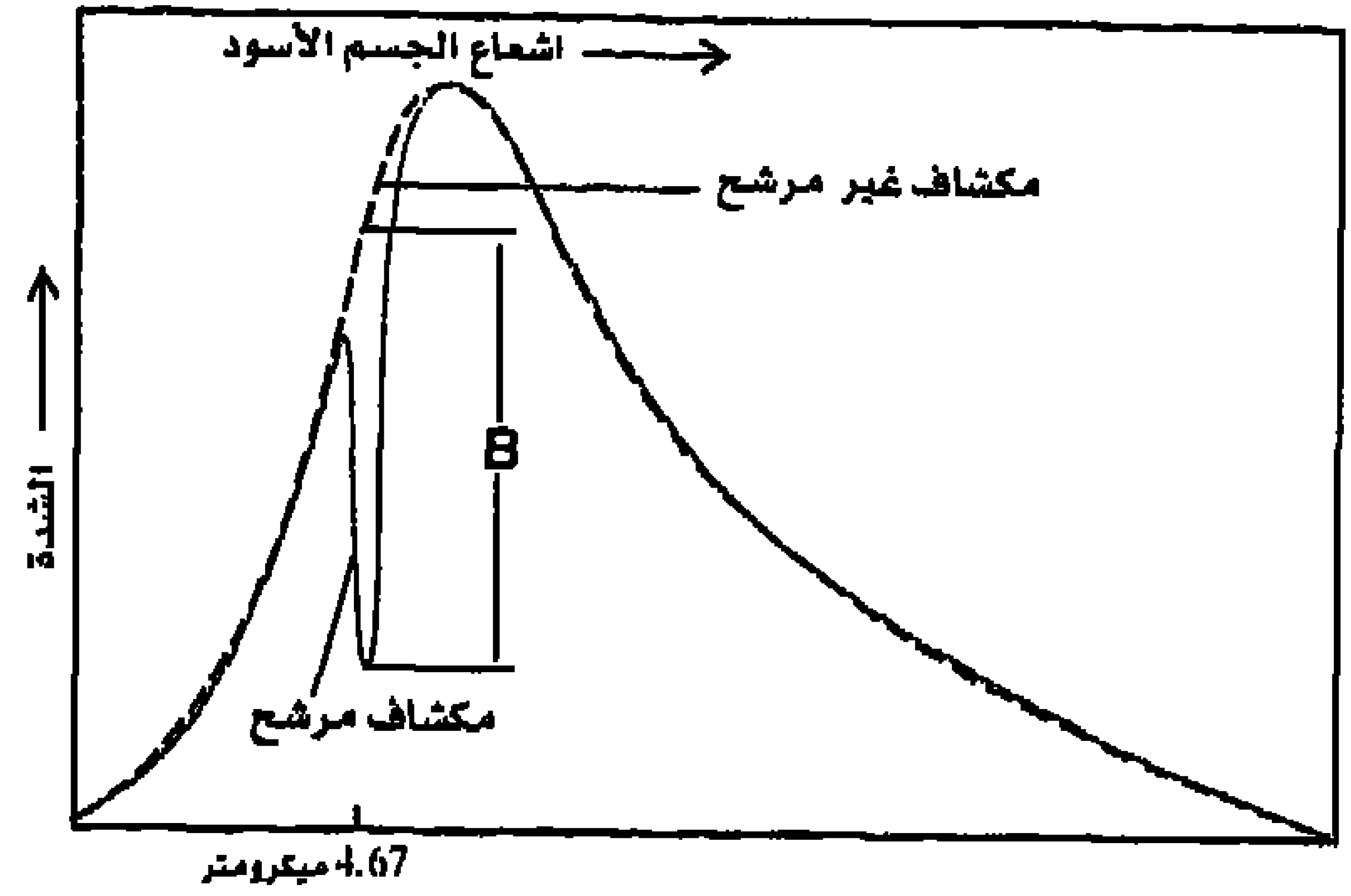
إن أحادي أكسيد الكربون الذي يحقن في الغلاف الجوي لا يبقى فيه إلى ما لا نهاية، وإنما يتلاشى بعد فترة تتراوح بين عشرة أيام وعدة شهور. وإن جزءاً منه يستقر على الأرض حيث تمتصه التربة. وفي الوقت نفسه بيّن (هـ. ليفي) Leavy Hiram من المرصد (السميثسوني) Smithsonian للفيزياء الفلكية في كامبردج بولاية ماستشوستس الأمريكية، الذي أجرت فيه مجموعة هارفارد دراستها تقريباً، أنّ الهيدروكسيل يمكن أن يزيل أحادي أكسيد الكربون من الهواء بتحويله إلى ثنائي أكسيد الكربون.

وعلى الرغم من كل هذا التقدم النظري فإن لغزي كيفية نشأة أحادي أكسيد الكربون واختفائه لا يمكن حلهما تماماً دون معرفة توزع هذا الغاز في الجو. وربما قدمت لنا دراسة المناطق ذات التركيز العالي غير العادي من الغاز (دلائل) Clues حول المصدر الذي يأتي منه أحادي أكسيد الكربون، في حين قد تكشف دراسة المناطق ذات التركيز المنخفض عن الأماكن التي يترك الغاز فيها الغلاف الجوي. لكن كيف، يمكن تجميع خرائط شاملة ومفصلة لتوزع أحادي أكسيد الكربون؟ إن القياسات التي تجرى فقط على الأرض أو بالطائرات تكون غير عملية، بسبب العدد الكبير من القياسات المطلوب إجراؤها. وقد تمر شهور أو سنوات قبل أن يستطيع أسطول من الطائرات جمع القراءات الكافية لرسم خريطة مفصلة، وقد تُغفل هذه الخريطة أنماط أحادي أكسيد الكربون قصير الأمد.

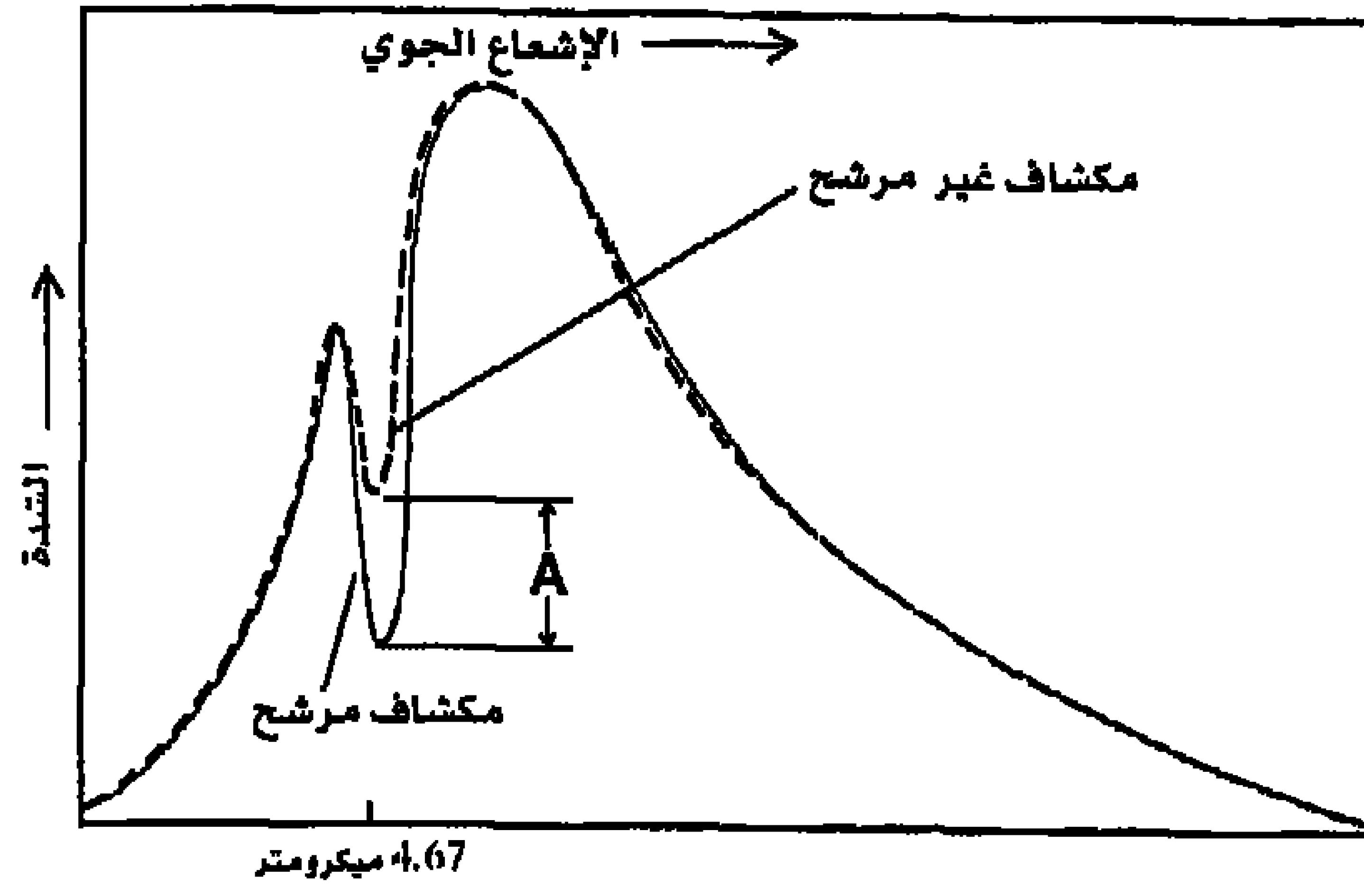
وفي الوقت نفسه الذي كانت مجموعة هارفارد وغيرها تقوم بدراساتها، كانت جماعات أخرى تدرس إمكان استخدام الأقمار الصنعية ذات المدارات الأرضية لإجراء (مسوحات) Surveys عالمية لأحادي أكسيد الكربون. ويمكن أن تَجمَع (الأجهزة المدارية «الدائرة حول الأرض») Orbiting Instruments عدداً كافياً من القياسات لوضع خريطة في أيام معدودة، وتكشف تقريباً عن الظروف الآنية عند مختلف خطوط الطول والعرض. وبينت الدراسات النظرية التي قام بها (س. لودفيك) Clauis Ludwing وزملاؤه في (شركة كونفير) Convair Incorporated أنه من الممكن قياس تركيز أحادي أكسيد الكربون من قمر صنعي بتقنية تدعى (قياس الإشعاع بمرشح الغاز) Gas- Filter Radiometry . وقد استخدمت هذه التقنية بالفعل من قبل مجموعة (ج.ت. هوتون) John T. Haughton بجامعة إكسفورد لقياس درجة حرارة الغلاف الجوي بواسطة القمر الصنعي (نيمبوس 4) Nimbus IV.

اختبرت عدة آلات تعتمد على تقنية مرشح الغاز على متن طائرة في (مركز بحوث لانكلي) Langley Research Center في الهيئة الوطنية للطيران والفضاء (ناسا). وتم قبول آلة منها، كان (أ. بارينكر) Anthony Barringer من مؤسسة بارينكر للبحوث في تورنتو، قد اقترح تطويرها كأداة قياس للاستخدام في قمر صنعي.

وقام أحدنا (ريشل) بدعوة كل من نوبل وسايلر لتشكيل فريق علمي للإشراف على تطوير تجربة، جرت على متن مكوك الفضاء. وخلال عام 1976 اقترحت هذه التجربة المسماة (قياس تلوث الهواء من الأقمار الصنعية) Measurement of Air Pollution from Satellites «MAPS» أثناء إحدى رحلات الاختبار المدارية للمكوك.



يمكن حساب نسبة المزج لأحادي أكسيد الكربون بمقارنة طيف الغلاف الجوي بالطيف المرجعي بواسطة مكاشيف الإشعاع. فمكشاف الإشعاع المجهز بمرشح خلية غاز لأحادي أكسيد الكربون يعطي إشارة ضعيفة وشبه ثابتة؛ لأن خلية الغاز تمتص بشدة كل الإشعاع تقريباً الواقع في مجال 4.67 ميكرومتر من أي مصدر. وعند ذلك الطول الموجي فإن مكشاف الإشعاع بدون مرشح يسجل إما



امتصاصاً جزئياً للإشعاع (عند قراءة الجو) أو عدم امتصاص (عند قراءة مرجع الجسم الأسود). ويرتبط رياضياتيا الفرق (A) بين المنحنيين عندما يرصد مكشافا الإشعاع الآخران الجو، بالفرق بين تركيز أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وداخل الخلية. أما الفرق (B) الذي يقارن الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود بامتصاص الخلية فيساعد على معايرة النظام.

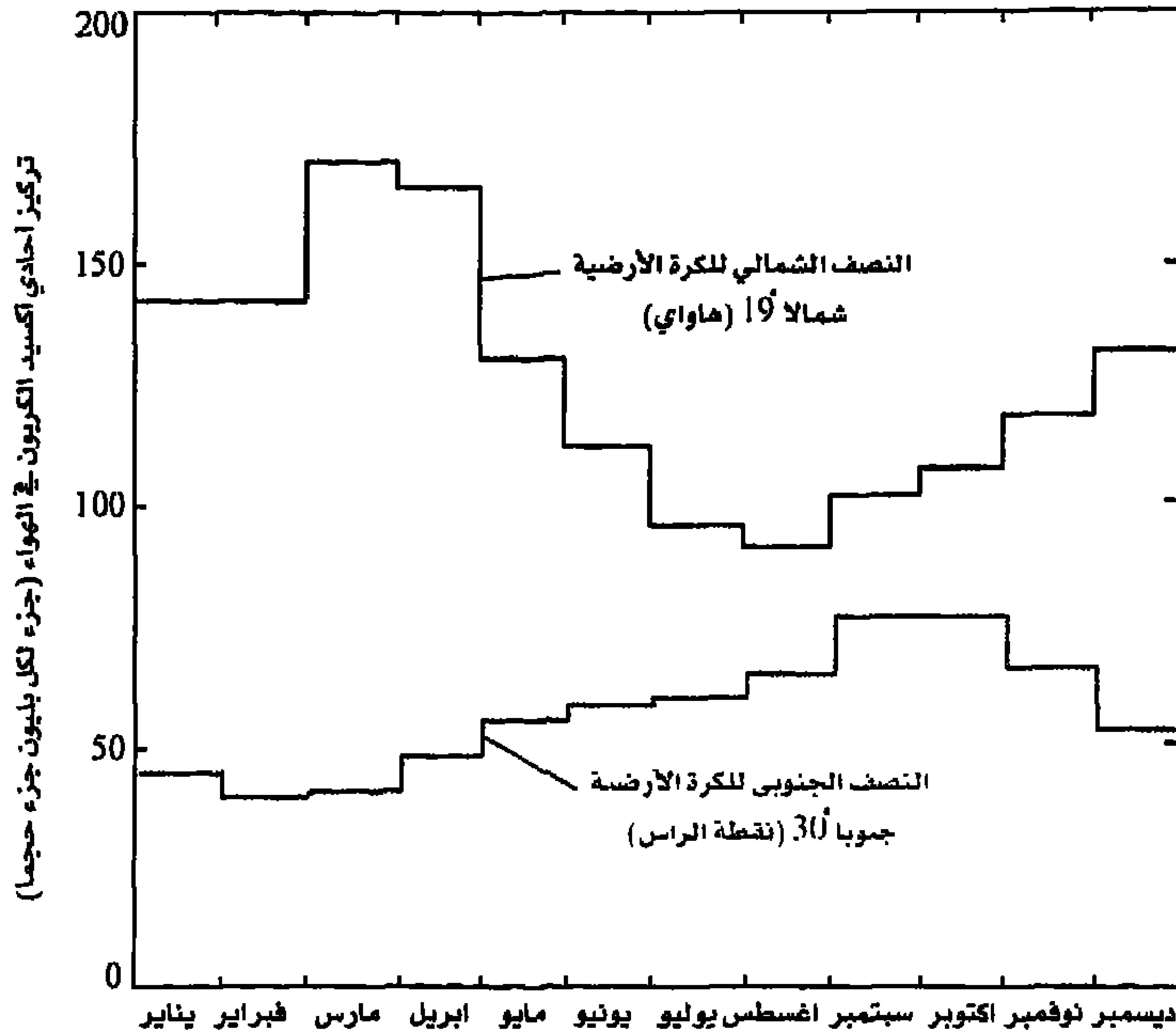
يعتمد مقياس الإشعاع بمرشح الغاز في تجربة MPAS على مبدأ امتصاص أحادي أكسيد الكربون للأشعة تحت الحمراء Infrared Radiation عند الترددات المتقطعة. وهذا النمط المتميز من الامتصاص يمكن أن يُستخدم لقياس تركيز الغاز في الغلاف الجوي. ويتصف غاز أحادي أكسيد الكربون بامتصاص طاقة الأشعة تحت الحمراء التي يقارب طول موجتها 4.67 ميكرومتر (جزء من المليون من المتر). لكن نموذج الامتصاص الدقيق يعتمد على كل من درجة حرارة الغاز وضغطه.

لقياس تركيز أحادي أكسيد الكربون في نقطة ما من الأرض توجه العدسة الشيئية لجهاز MAPS إلى كوكب الأرض، وتجمع الإشعاع من غلافه الجوي. ثم يتم تقطيع chopped الإشعاع بشكل دوري ومنتظم بواسطة (دولاب «عجلة» Wheel دوّار، يتولى بدوره إصدار ومضات من الأشعة تحت الحمراء من خلال قرص أسود من الألومنيوم ذي درجة حرارة يجري التحكم فيها. وهذا القرص المسمى (منبع الجسم الأسود) Blackbody Source يشع طيفاً معلوماً لا يفقد أي شيء نتيجة للامتصاص عند أي طول موجي. وهذا الطيف المتدفق يُعد مرجعاً لقياس كمية الإشعاع التي امتصها الغلاف الجوي. تمر حزمة الأشعة المجمعة خلال مرشح يَستَبعدُ كافة الموجات باستثناء تلك التي يُقارب طولها الموجي 4.67 ميكرومتر. وتوجه (مفرقات الحزمة) Beam Splitters هذا الإشعاع المختار إلى ثلاثة (مكاشيف ضوئية) Photodetectors. يوضع أحد هذه المكاشيف خلف خلية غاز زجاجية شفافة مُفرَّغة. ويقيس على التناوب الشدة المطلقة لإشارة الأشعة تحت الحمراء من الغلاف الجوي. وتلك الصادرة عن منبع الجسم الأسود. ويوضع الكاشفان الآخران خلف خلايا مملوءة بغاز أحادي أكسيد الكربون تحت ضغوط مختلفة، ويُخزِّن جهاز تسجيل الرحلة الجوية ثلاثة قياسات: (نتاج Output الزمن المسجل إلكترونياً لمكشاف الخلية المفرغة والفرقين بين ذلك النتاج وناتج مِكْشافَي مرشح الغاز.

إنَّ إشارتي الفرق تمثلان درجات التشابه بين الأطياف المتغيرة للغلاف الجوي والإشارات الثابتة الصادرة عن كل خلية من خلايا أحادي أكسيد الكربون النقي. وعندما تكون المنطقة الجوية التي نقيسها خالية نسبياً من أحادي أكسيد الكربون يكون الفرقان كبيرين، وحين يصبح الغلاف الجوي غنياً بأحادي أكسيد الكربون يقل الفرقان. ونستطيع استنتاج نسبة أحادي أكسيد الكربون في الجو على أساس هذه القياسات، وقيم الضغوط ودرجات الحرارة داخل خلايا الغاز، وتُعرف تلك النسبة (بنسبة المزج) Mixing Ratio.

ونظراً لأن الطيف الإشعاعي لأحادي أكسيد الكربون يتغير بتغير الضغط فإن كل مكشاف يستجيب بشدة أكبر لأحادي أكسيد الكربون في مختلف الارتفاعات. فمكشاف الإشعاع الواقع خلف خلية أحادي أكسيد الكربون عند ضغط يساوي 266 مليمتر زئبق، يكون أكثر حساسية للغازات عند الارتفاعات التي تتراوح بين 3 و 8 كيلومترات، في حين يكون المكشاف الواقع خلف الخلية حيث يبلغ ضغط الغاز 76 مليمتر زئبق، مناسباً أكثر للارتفاعات الأعلى من ذلك. ويستجيب مكشاف الإشعاع ذو الغاز دون مرشح بقدر أكبر للإشعاعات الصادرة عن الأرض. وتساعدنا منحنيات الاستجابات المختلفة لمكاشيف الإشعاع على تقدير ارتفاعات أحادي أكسيد الكربون المُقاس خلال تجارب MAPS.

إن تحديد نسبة المزج لأحادي أكسيد الكربون من قياسات مقياس الإشعاع، يقتضي معرفة بعض العوامل الأخرى التي تؤثر في الإشعاع المار خلال الغلاف الجوي. لذلك أدخلنا في حسابنا الأحوال الجوية، وزاوية الشمس خلال مراقبتنا، وحسابات قدرة الأرض على عكس الضوء. وكانت المعلومات التي أمدَّنا بها (مركز القياسات العددية لدراسة المحيطات في بحرية الولايات المتحدة) U. S. Navy Fleet Numerical Oceanography Center قيِّمة



جرى قياس التغيرات الفصلية في تركيز أحادي أكسيد الكربون الجوي في نصفي الكرة الأرضية. فأخذت قياسات النصف الشمالي للكرة الأرضية في مرصد (ماونا لوا) mauna loa في هاواي، في حين أخذت قياسات النصف الجنوبي من محطة أرضية عند نقطة الرأس على رأس الرجاء الصالح في جنوب إفريقية. ولقد حسب المتوسط الشهري لتراكيز أحادي أكسيد الكربون اعتماداً على تسجيل مستمر في القياسات وعلى مدى خمس سنوات على الأقل. ووصلت نسبة المزج لأحادي أكسيد الكربون في كلا النصفين إلى ذروتها قرب فصل الربيع المحلي. ويحتمل أن يرجع ذلك إلى أن الأشجار تطلق كميات كبيرة من الهيدروكربونات التي تتأكسد إلى أحادي أكسيد الكربون.

جداً. وقد قمنا بتطوير نماذج جوية ساعدتنا على تصحيح قياساتنا عند وجود بخار الماء وثنائي أكسيد الكربون والأوزون وأكسيد الأزوت، الذي يمتص كل منها طاقة الأشعة تحت الحمراء بالقرب من الطول الموجي4.67 ميكرومتر.

كذلك يمكن للسحب أن تسهم في تحريف نتائج القياس في مجال رصد الجهاز، لذلك قمنا بتصحيحها. وخلال إجراء تجارب MAPS في أول رحلة لمكوك الفضاء، قمنا بتصوير جو الأرض أثناء أخذ القياسات، بآلة تصوير مضبوطة مع محور مقياس الإشعاع. وفيما بعد قام زميلانا (و.د. هيبس) Wareen D. Hypes من مركز بحوث (لانكلي) langley و(ب.ب. جورمسن) Barbara B. Gormsen التي كانت تعمل آنذاك في مؤسسة البحوث بجامعة (أولد دومينيون) Old Dominion في (نورفولك) Norfolk بفحص هذه الصور بعناية فائقة للبحث عن أية دلائل نتيجة الحجب الناجم عن السحب، واستبعدا من مجموعة بيانات MAPS أية قياسات لأحادي أكسيد الكربون أخذت من خلال السحب.

هذا وقد تم اختبار حساسية جهاز MAPS عند كل نسب المزج العالية، والمنخفضة لأحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وفيما يتعلق باختبار نسبة المزج العالية، وضعنا مقياس الإشعاع في طائرة حلقنا بها فوق بحيرة متشيغان، للكشف عن أحادي أكسيد الكربون الناشئ عن زحام المرور في ساعة ذروته صباحاً بمدينة شيكاغو، فاكتشفنا (غمامات) Plumes من غاز أحادي أكسيد الكربون منبعثة من كل من شيكاغو وميلووكي . وقد بينت غمامة شيكاغو أن تركيز أحادي أكسيد الكربون في كل بليون جزيء من الهواء وهي قيمة عالية، لكنها غير مفاجئة.

ولكن المفاجأة كانت في الاختبار الذي افترضنا فيه نسبة المزج القليلة، فقد سجل MAPS لأول مرة تراكيز عالية من أحادي أكسيد الكربون في مناطق نائية غير متطورة صناعياً. ففي صيف 1979 نفذ MAPS مشروعاً عالمياً لدراسة الرياح الموسمية الهندية أطلق عليها اسم (مونيكس) Monex. ووضع مقياس الإشعاع في MAPS على متن طائرة كونفير 990 تابعة لـ (ناسا) NASA، فسجل قراءات خلال رحلات طويلة عبر بحر العرب على ارتفاع 12 كيلومتراً تقريباً، تم التحقق منها بتحليل عينات من الهواء جمعت في قوارير خلال الرحلة من قبل (إ.ب. كوندون) Estelle P. Condon التي كانت تعمل عندئذ في جامعة أولد دومينيون.

وكم كانت دهشتنا عندما اكتشف في تلك الرحلات أن تراكيز أحادي أكسيد الكربون في طبقات الغلاف الجوي فوق المملكة العربية السعودية ووادي نهر الكانك في الهند، أعلى مما وجدناه في شيكاغو في ساعة ذروة الزحام. ووصلت نسبة المزج كما بيّنتها قياسات MAPS وكذلك عينات قوارير الهواء إلى ما يزيد على 300 جزيء من أحادي أكسيد الكربون في كل بليون جزيء من الهواء. وكان التركيز أقل من ذلك بكثير إذ وصل إلى 80 جزيئاً في كل بليون جزيء هواء فوق بحر العرب وبالقرب من خط الإستواء حيث كان الهواء الآتي من النصف الجنوبي للكرة الأرضية يدخل في (دورة الرياح الموسمية) Monsoon Circulation.

ومع تقدم العمل فيMAPS تجمعت دلائل أخرى ضد الفكرة القديمة التي تربط وجود أحادي أكسيد الكربون بالمناطق المتقدمة صناعياً وتقصره عليها تقريباً. وخلال فصل الجفاف في أغسطس/آب وسبتمبر/أيلول 1980 اشترك أحدنا (سايلر) مع باحثين من المركز الوطني للبحوث الجوية في (بولدر) Boulder بكولورادو، في دراسة أحادي أكسيد الكربون وغازات أخرى متعددة فوق البرازيل. لقد بينت القياسات التي أخذت بواسطة طائرة، وجود تراكيز في الطبقة المتاخمة للأرض تصل إلى 400 جزيء في كل بليون جزيء من الهواء فوق غابات استوائية مطيرة لم يصلها الإنسان. بل وجدت قيم أعلى من ذلك كان بعضها أكبر من سعة المقياس قرب مناطق حشائش السافانا التي كانت تحترق في البرازيل.

وهكذا ظهرت نظريات جديدة تفسر كيف تسهم الغابات في تزويد الغلاف الجوي بأحادي أكسيد الكربون، وانطلاقاً من البيانات البرازيلية اقترح (ب.ج. كروتزن) Paul J. Crutzen من معهد ماكس بلانك [*انظر: «الغلاف الجوي المتغير» العلوم، 7(3)، 1990، ص16*].

إن كميات كبيرة من أحادي أكسيد الكربون يمكن توليدها فوق الغابات الاستوائية المطيرة والبكر، من خلال عمليات الأكسدة الكيماوية الضوئية للهيدروكربونات التي لا تتضمن الميثان، وتنشأ هذه الهيدروكربونات من الراتينجات والزيوت التي تكونها الأشجار أساساً، وقد توصل إلى نتائج مشابهة في الآونة الأخيرة كل من (أ. مارينكو) Alain Marenco من مركز الفيزياء الذرية في تولوز و(ج.س. ديلوني) Jean Claude Delauny من مختبر الفيزياء الجوية في أبيدجان بساحل العاج بناء على معلومات جمعت من فوق الغابات الاستوائية في إفريقية.

كذلك يرى كروتزن الذي كان يعمل مع سايلر أن احتراق (الكتلة الحيوية) Biomass كالنباتات التي تجتث من مساحات واسعة من الأرض، أو بقايا الحيوانات التي تحرق كوقود، يعد مصدراً أساسياً لكربون الغلاف الجوي. ويتحول جزء صغير فقط من هذا الكربون إلى أحادي أكسيد الكربون، في حين يتأكسد الجزء الأكبر منه إلى ثنائي أكسيد الكربون وجسيمات كربونية. ووفقاً لحسابات سايلر وكروتزن يسهم احتراق الكتلة الحيوية سنوياً بمقدار يتراوح بين بليوني طن وأربعة بلايين طن متري من الكربون في الغلاف الجوي، كذلك بينت أبحاث (H. كاشير) Helen Cashier وزملائها في مركز نشاط الإشعاعات الضعيفة في (جيف ـ سير ـ إيفيت) Gif- Sur – Yvette أن (الهباء الجوي «الأيروسولات») Aerosols الكربوني المتصاعد من الغابات الاستوائية، يضيف إلى الغلاف الجوي جسيمات كربونية دقيقة بما يعادل كافة ما تنتجه المصادر الصناعية الأخرى. وينشأ هذا الهباء الجوي (الأيروسولات) خلال فصل الجفاف، حين تحدث معظم الحرائق الطبيعية أو الناشئة بفعل الإنسان.

وعلى أساس كل هذه المعلومات الجديدة المدهشة والنظريات الحديثة أطلق مقياس الإشعاع في MAPS إلى الفضاء على متن رحلة المكوك الفضائي الهندسية الاختبارية الثانية في نوفمبر/تشرين الثاني 1981. وبسبب عطل في (قدرة) Power المكوك، وأنظمة تبريده، فإن المعلومات النافعة لم تُجمع إلا خلال 11 ساعة فقط وعلى مدار يومين، وتمثل نحو 10000 قياس لأحادي أكسيد الكربون على ارتفاعات تراوحت بين 3 و12 كيلومتراً.

وكانت المناطق التي جرى رصدها، تقع في الحزام المداري بين خطي عرض 37 درجة شمالاً و37 درجة جنوباً. واستطاع جهاز MAPS تسجيل الإشعاعات من مناطق متتابعة على سطح الأرض بعرض 20 كيلومتراً، وذلك عندما كان المكوك على ارتفاع 260 كيلومتراً. وقسمت هذه المناطق، التي تمت مراقبتها، إلى شبكة مربعات مساحة كل منها 5 درجات طول ×5 درجات عرض. وعدّلنا التغيرات البسيطة في البيانات بالحصول على متوسط القراءات المتعددة التي حصلنا عليها من كل مربع.

عندما حللنا بيانات MAPS، التي حصلنا عليها بهذه الطريقة، أفزعتنا الصورة التي ظهرت لنا حول توزع أحادي أكسيد الكربون في العالم. وكان أقل ما أدهشنا هو ملاحظة تدني نسبة المزج التي كانت نحو 40 جزيئاً في كل بليون جزيء هواء، فوق الجنوب الشرقي للمحيط الهادي والأرجنتين، حيث تهب رياح الغرب عبر مساحات شاسعة من المحيط. ولما كانت الدراسات السابقة قد أسقطت من حسابها المحيطات كمصدر رئيسي لأحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، فقد اتفقت هذه الاكتشافات مع توقعاتنا.

لاحظنا قيماً أعلى لأحادي أكسيد الكربون، حوالي 75 جزيئاً من كل بليون جزيء من الهواء فوق شرق البحر المتوسط والكتل الأرضية المحيطة به. فقد مر الهواء نفسه قبل ذلك، على أوروبة الغربية خلال وقت كانت فيه تيارات الحمل على أشدها. ويفترض أن احتراق الوقود الأحفوري هو المسؤول عن هذه القيم العالية.

أما المفاجأة الكبرى فقد تمثلت في القيم المرتفعة لتركيز أحادي أكسيد الكربون والمسجلة فوق مناطق لا توجد فيها صناعة أو حركة مرور كثيفة، وأن الكثير منها يوجد في النصف الجنوبي للكرة الأرضية أو حول المدارين. وقد ظهرت قراءات فوق شمال أمريكة الجنوبية ووسط إفريقية وشرق الصين، كلها أعلى من 100 جزيء في كل بليون جزيء من الهواء (وجدت أعلى قراءة فوق خليج غينيا على طول الساحل الاستوائي الغربي لإفريقية، وربما كانت هذه القراءة راجعة إلى خطأ إحصائي ناشئ عن قلة عدد القراءات المفيدة).

ترى من أين كان يأتي أحادي أكسيد الكربون الموجود فوق هذه المناطق المختلفة صناعياً؟ لقد فحصنا خرائط سرعة الرياح وتقارير تيارات الحمل لهذه المناطق خلال شهر نوفمبر/تشرين الثاني. وتبين أن الهواء المحمل بأحادي أكسيد الكربون والمنساب

من ارتفاعات 10 كيلومترات إلى 12 كيلومتراً فوق أمريكة الجنوبية والمنطقة الاستوائية في المحيط الأطلنطي، قد نشأ في الغلاف الجوي فوق الغابات الاستوائية. وقد هب الهواء فوق الصين عبر الغابات الاستوائية في شمال غرب بورما في اليوم السابق لأخذ العينات. أما المنطقة الأرضية الواقعة مباشرة تحت الطبقة المتاخمة لوسط إفريقية التي جرى القياس فيها، فقد كانت كلها منطقة حشائش وسافانا، أما مناطق الغابات الاستوائية المطيرة فتقع على بعد 500 كيلومتر منها.

أصبح من الواضح أن هناك مصدراً آخر غيرالصناعة منتجاً لغمامات أحادي أكسيد الكربون في هذه المناطق المتخلفة صناعياً. فالغابات الاستوائية القريبة من هذه المناطق وكذلك احتراق النباتات في منطقة السافانا يمكن أن يلعبا دوراً هاماً في تكوين أحادي أكسيد الكربون. وبعبارة أخرى فإن النظريات التي اقترحها كروتزن وسايلر وغيرهما يمكن أن تفسر البيانات التي جمعها MAPS في أول رحلة لمكوك الفضاء. وأملنا في قياسات الرحلة الثانية لمكوك الفضاء أن تؤكد وتكمّل هذه الاكتشافات.

قبل تجربة رحلة المكوك الثانية عُدل جهاز MAPS بحيث يوفر نظاماً بسيطاً لاكتشاف السحب. فملئت خلية واحدة فقط بغاز أحادي أكسيد الكربون. وأدى هذا التغير إلى تغير بسيط في قدرتنا على تحديد ارتفاعات سحب أحادي أكسيد الكربون، لكن ذلك بقي مقبولاً لنا. أما الخلية الأخرى فقد ملئت بأكسيد الأزوت الذي يمتزج بالهواء بنسبة تكاد تكون ثابتة وهي 305 جزيئات في كل بليون جزيء من الهواء وذلك في أدنى 12 كيلومتراً من الغلاف الجوي. وأكسيد الأزوت شأنه شأن أحادي أكسيد الكربون، يمتص الطاقة بدرجة تقارب 4.67 ميكرومتر. وبهذا الترتيب الجديد نستطيع قياس نسبة مزج كل من أحادي أكسيد الكربون وأكسيد الأزوت. ولما كانت نسبة مزج أكسيد الأزوت شبه ثابتة، فإن أية تذبذبات يسجلها الجهاز لابد وأن تكون ناشئة عن الغمامات التي تحجب الرؤية وتتحرك في المجال المرئي. وبالبحث عن مثل هذه التذبذبات نستطيع مباشرة تعرف واستبعاد المعلومات المصاحبة لها والخاصة بأحادي أكسيد الكربون والتي ستكون محرفة. وقد أدى هذا التغير في إعداد الجهاز إلى استبعاد الإجراء الممل الخاص بفحص صور السحب.

انطلقت الرحلة الثانية لمكوك الفضاء ومعها MAPS في أكتوبر/تشرين الأول 1984. وكان من المخطط أن تنطلق في بداية ربيع ذلك العام. ولكن التأخير في إطلاق المكوك أجّل ميعاد التجربة. كان هذا من سوء الحظ لأننا كنا نأمل أن تقوم القراءات التي سنأخذها في الربيع بإتمام البيانات التي حصلنا عليها في نوفمبر/تشرين الثاني 1981، وأن تعطينا بعض الدلائل على تغيرات أحادي أكسيد الكربون على مدار العام. وسبق لسايلر وزملائه رصد الهواء من محطات أرضية في نصفي الكرة الأرضية.

ووجدوا تغيرات موسمية ملحوظة، مع بلوغ أحادي أكسيد الكربون الذروة في فصل الربيع.

لكن MAPS نفذت بقية جوانب المشروع بواسطة رحلة المكوك الثانية، مما أدى إلى نتائج أفضل. ذلك لأن مدار المكوك في تلك الرحلة مر عبر مدى أوسع من خطوط العرض ــ من 57 درجة شمالاً إلى 57 درجة جنوباً ــ وبالتالي غطى الرصد مدى جغرافياً أوسع بكثير. فخلال فترة تسعة أيام تم جمع قراءات لمدة 86 ساعة، واستخدمت تلك القياسات لرسم خريطتين تبين كل منهما أنماط متوسط تركيز أحادي أكسيد الكربون على مدى فترة أربعة وخمسة أيام متتالية.

كان نمط توزع أحادي أكسيد الكربون المسجل في أكتوبر/تشرين أول 1984 مشابهاً لما تم ملاحظته في نوفمبر/تشرين الثاني 1981. فلقد رُصدت قيم نسبة المزج التي تزيد على 100 جزيء من أحادي أكسيد الكربون في كل بليون جزيء من الهواء، فوق أمريكة الجنوبية وجنوب إفريقية وأوربة والاتحاد السوفييتي والصين وشمال المحيط الهادي وجنوب المحيط الهندي. وكانت القيم الصغرى التي رصدت تقع فوق المنطقة الاستوائية للمحيط الهادي وشمال الأطلنطي ومنطقة الصحاري والأرجنتين.

أكدت الصور التي التقطتها من الفضاء رائدة الفضاء (ك.د. سوليفان) Kathryn D. Sullinan من «ناسا» وجود ارتباط بين الحرائق الكبرى التي شوهدت من مدار المكوك، وبين السحب الغنية بأحادي أكسيد الكربون. فمثلاً شوهد الدخان المتصاعد من الحرائق بالقرب من مصب نهر الزامبيزي في إفريقية متجهاً إلى داخل اليابسة تحمله رياح شرقية. ورفعت تيارات الحمل هذا الدخان إلى ارتفاعات تراوحت بين 5 و10 كيلومترات. واستطاع مقياسMAPS للإشعاع اكتشاف أحادي أكسيد الكربون الذي يحتوي عليه ذلك الدخان.

لمعايرة بيانات MAPS لعام 1984 أجرت مجموعة البحث برئاسة سايلر قياسات مستفيضة من طائرة طارت عبر المحيط الأطلنطي خلال رحلة المكوك. ونظراً لأن الجهاز الذي أجرى هذه القياسات كان على اتصال مباشر بالهواء، فقد كان حساساً لنسبة المزج الأقل من جزيء واحد من أحادي أكسيد الكربون في كل بليون جزيء من الهواء. وقد أخذت تلك القياسات على ارتفاع نحو 10 كيلومترات خلال الرحلات من فرانكفورت إلى ساوباولو وبالعكس.

كان هناك تطابق كبير بين نماذج توزع أحادي أكسيد الكربون التي رصدت بجهاز MAPS، أو بواسطة الطائرة. لكن القياسات التي أخذت من الطائرة كانت دائماً أعلى بنسبة 40 بالمئة من قياسات MAPS. ومازال البحث قائماً لدراسة هذا الاختلاف.

إن كافة القياسات التي رُصدت من MAPS والطائرة في خريف نصف الكرة الشمالي، وفي ربيع النصف الجنوبي، توحي

إيحاءً قوياً، بأن الغابة الاستوائية والسافانا، تعد أكثر أهمية من الوقود الأحفوري، كمصادر لأحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وتسهم كل من الحرائق وأكسدة الهيدروكربونات في تكوين هذا الغاز. وعلى الرغم من تماثل قيم التراكيز العالية في أنحاء متفرقة من العالم، فإن هناك على ما يبدو عدة (آليات) Mechanisms متميزة لتوليد أحادي أكسيد الكربون.

إن الأهمية النسبية لمختلف الآليات التي تضيف أحادي أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي تعتمد على الموقع. فأكسدة الميثان وغيره من الهيدروكربونات تعد مصدراً رئيسياً لأحادي أكسيد الكربون في كل من نصفي الكرة الأرضية. بالمقابل فإن التفاعلات الكيماوية الحيوية في التربة، وفي النباتات تُنتج من هذا الغاز كميات ضئيلة نسبياً وأقل أهمية. وبشكل عام يعتبر احتراق الوقود الأحفوري المصدر الرئيس لأحادي أكسيد الكربون في البلدان المتطورة من النصف الشمالي للكرة الأرضية، في حين يشكل احتراق الكتلة الحيوية المصدر السائد في النصف الجنوبي للكرة الأرضية والمناطق الاستوائية.

إن كمية أحادي أكسيد الكربون الناشئة عن احتراق المساحات الخضراء، والذي ينجم في معظمه عن النشاطات البشرية في الدول النامية، تثير قضايا مقلقة. فإلى أي مدى يتناسب معدل فقدان الغابات للكربون بواسطة الحرائق مع معدل اندماج الكربون في الأشجار النامية بواسطة التمثيل الضوئي والتنفس؟ وما هي العواقب البيئية المترتبة على ذلك؟

تعتمد الشعوب في الدول النامية اعتماداً كبيراً على الخشب كوقود، كما أنهم يحرقونه لإفساح المكان لرعي الماشية والزراعة، وإقامة المستوطنات الجديدة. وفضلاً عن ذلك فإن معدل الإحراق في ارتفاع مستمر بسبب الضغوط الاقتصادية والنقص في الوقود.

قدر سايلر وكرتزن، اعتماداً على البيانات الإحصائية، أن ما مقداره 0.5 إلى 0.75 بالمئة من الغابات الاستوائية المطيرة يحترق سنوياً. ومع نقصان الأساس الإنتاجي للغابات وازدياد معدل الإحراق، فإن النسب المئوية للغابات المتلفة تزداد بسرعة فائقة. ويسمح لبعض المساحات المعدة للأخشاب بالنمو مرة أخرى في بعض المناطق، لكن الغابات المستصلحة للزراعة تضيع إلى الأبد.

إن اختفاء الغابات الاستوائية المطيرة، أو حتى النقص الحاد في مساحاتها، قد يؤدي إلى تغيير الطقس بشكل خطير، بسبب ظواهر التبخر والتبادل الحراري على سطح الأرض. ذلك لأن أوراق الأشجار تُعيد إلى الغلاف الجوي، كميات كبيرة من الرطوبة بإطلاقها بخار الماء أثناء النهار. كما أن إزالة الأشجار تؤدي إلى زيادة جريان مياه الأمطار على سطح الأرض، مما يقلل من كمية المياه العالقة في التربة، والتي ستتبخر فيما بعد. أضف إلى ذلك أن التبخر يمتص الطاقة الشمسية، مما يُحدّ من تسخين التربة بفعل الشمس. وبالنتيجة فإن اختفاء الأشجار سيزيد من درجات الحرارة إلى حد بعيد.

إن النتائج المترتبة على إتلاف الغابات، لن تكون محلية فقط لأن التبخر ينقل الطاقة الشمسية بكفاءة إلى الغلاف الجوي على ارتفاعات عالية. وإذا لم تحدث ظاهرة التبخر، فإن الحرارة الصادرة عن الأرض الدافئة ستنتقل مباشرة إلى الطبقات المنخفضة للغلاف الجوي. من ناحية أخرى فإن بخار الماء يصعد عادة إلى ارتفاعات من 2 إلى 8 كيلومترات قبل أن يطلق حرارته الكامنة متكثفاً على شكل أمطار. وإطلاق الحرارة عند تلك الارتفاعات يتحكم في الطقس وتيارات الهواء في العالم. ومن الصعب التنبؤ بعواقب هذه التغيرات.

ومن الصعب أيضاً التنبؤ بالكيفية التي سيتغير بها الطقس والتركيب الكيماوي للغلاف الجوي، نتيجة لانطلاق كميات كبيرة من أحادي أكسيد الكربون، والناجمة عن احتراق الكتلة الحيوية. ولما كانت جذور الهيدروكسيل الموجودة في الجو تتفاعل بسهولة مع أحادي أكسيد الكربون، فيُخشى أن تُستهلك نظراً لتزايد انطلاق هذا الغاز. بحيث لا يتبقى من هذه الجذور إلا القليل لتتفاعل مع الجزيئات الأخرى كالميثان. يمكن لهذا الاضطراب في التوازن الكيماوي للغلاف الجوي أن يفسر التزايد الملحوظ للميثان في الجو خلال السنوات الأخيرة. فالميثان كثنائي أكسيد الكربون، من غازات الجُنّة (البيوت النباتية)، يحجز في الجو الحرارة التي تطلقها الأرض ثانية إلى الفضاء. ويزداد القلق حالياً من تغير مناخ العالم بفعل التأثير المحتمل لظاهرة الجُنّة الناجمة عن الكميات الضخمة لثنائي أكسيد الكربون المتحرر في الغلاف الجوي. لكن تزايد تركيز أحادي أكسيد الكربون، وبالنتيجة تزايد تركيز غاز الميثان سيُعقد المشكلة.

كما أن تزايد تركيز أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، يساعد على تكوين الأوزون في الارتفاعات المنخفضة نسبياً، ويبدو أن أوزون هذه الارتفاعات فعال في حجب الأشعة فوق البنفسجية الضارة. وهكذا فإن هذا الأوزون سيقوم بتعويض طبقة الأوزون (الستراتوسفيرية) Stratospheric التي أُتلفت بسبب تفاعله مع ملوثات الجو من مركبات الكلوروفلوروكربون. لكن الزيادة الصغيرة من تركيز الأوزون قد تهدد نمو النباتات. ويمكن أن تقلل من معدل نمو بعض غابات أشجار الأخشاب الصلبة.

إن الدراسات حول أحادي أكسيد الكربون مسألة ذات أهمية حيوية، إذ يجب البحث كيف ينتج ويتوزع هذا الغاز، وكيف يمكن إزالته. لقد برهنت أجهزة MAPS أنها أداة نافعة للكشف عن أحادي أكسيد الكربون الناشئ عن احتراق الكتلة الحيوية والوقود الأحفوري والمصادر الطبيعية على ارتفاعات عالية. إن تكرار تجارب MAPS في فصول أخرى باستثناء فصل الخريف في

النصف الشمالي للكرة الأرضية، سيساعد على فهم التغيرات الفصلية لتركيز أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لنصفي الكرة الأرضية. كما أن القياسات الإضافية تؤدي إلى معرفة توزع هذا الغاز فوق المحيطات. وسوف يؤدي مزيد من التحسن في MAPS إلى زيادة حساسية مكشاف أحادي أكسيد الكربون في الطبقات المنخفضة من الغلاف الجوي، مما سيسمح بقياسات مباشرة أكثر دقة لكميات أحادي أكسيد الكربون الناجمة عن عمليات الاحتراق أو المتكونة محلياً.

المؤلفون

R.E. Newell , H.G. Reichle Jr., W. Seiler

تعاون هؤلاء على دراسة أحادي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من خلال مشروع (قياس تلوث الجو من الفضاء) MAPS. نويل هو أستاذ علم الأرصاد الجوية في معهد ماستشوستس للتقانة. ويهتم بصورة رئيسية في فيزياء التغيرات الجوية، وفي التوزيع العام للجو على نطاق واسع. أما ريشل فهو باحث أول في مركز لانكلي للبحوث التابع لوكالة الفضاء الأمريكية NASA، وهو يبحث في الاستشعار عن بعد للخصائص الجوية منذ عام 1965. وسايلر هو مدير معهد (فراونهوفر) Fraunhofer لبحوث البيئة الجوية في (كارمش — بارتنكيرشن) Garmisch – Partenkirchen بألمانية.

مراجع للاستزادة

THE CYCLE OF ATMOSPJERIC CO. W. SEILER IN TELLUS. VOL. 26.NO. 116, pages 118-135,1974.

ESTIMATES OF GROSS AND NET FLUXES OF CARBON BETWEEN THE BIOSPHERE AND THE ATMOSPHERE FROM BIOMASS BURNING. W. seiler and p. J . Crutzen in Climatic Chang, VOL. 2, D. reidel publishing Co., 1980.

TROPOSPHERIC CHEMISTRY: A GLOBAL PERSPECTIVE.J. A. Logan, M. J. parther, S. C. Wofsy and M. B. Mcelroy in *Journal Of Geophysical Research*, VOL. 86, NO. C8, pages 7210-7254; August 20, 1981.

MIDDEL AND UPPER TROPOSPHERIC CARBON MONOXIDE MIXING RATIOS AS MEASURED BY A SATELLITE-BORNE REMOTE SENSOR DURIG NOVEMBER 1981. H. G. Reichle, Jr., V. S. Connors, J. A. Holland, W. D. Hypes, H. A. Wallio, J. C. Casas, B. B. Gormsen, M. S. Saylor and W. D. Hesketh in *Journal Of Geophysical Research*, VOL. 91, NO. C9, pages 10865-10887; September 20, 1986.

THE DISTR IBUTION OF MIDDLE TROPOSPHERIC CARBON MONOXIDE DURING EARLY OCTOBER 1984. H. G. Reichle, Jr., J. C. Casas, E. P. Condon, V. S. Connors, B. B. Gormsen, J. A. Holland, W. Seiler, R. T. Sherrill and H. A. Waillo in *Journal of Geophysial Research*, in press.



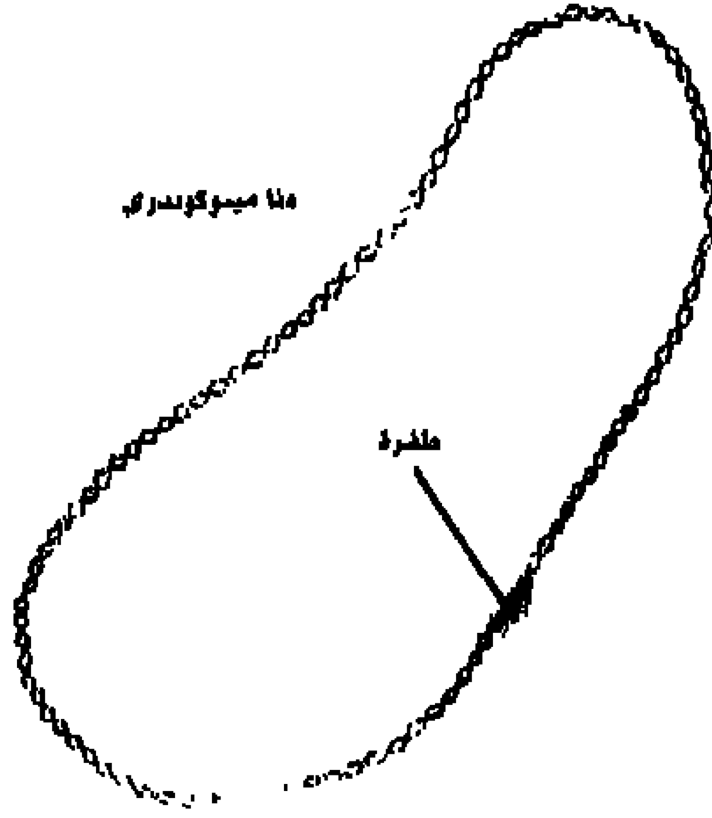
دور دنا [1] الميتوكوندريات [2] في الشيخوخة والمرض

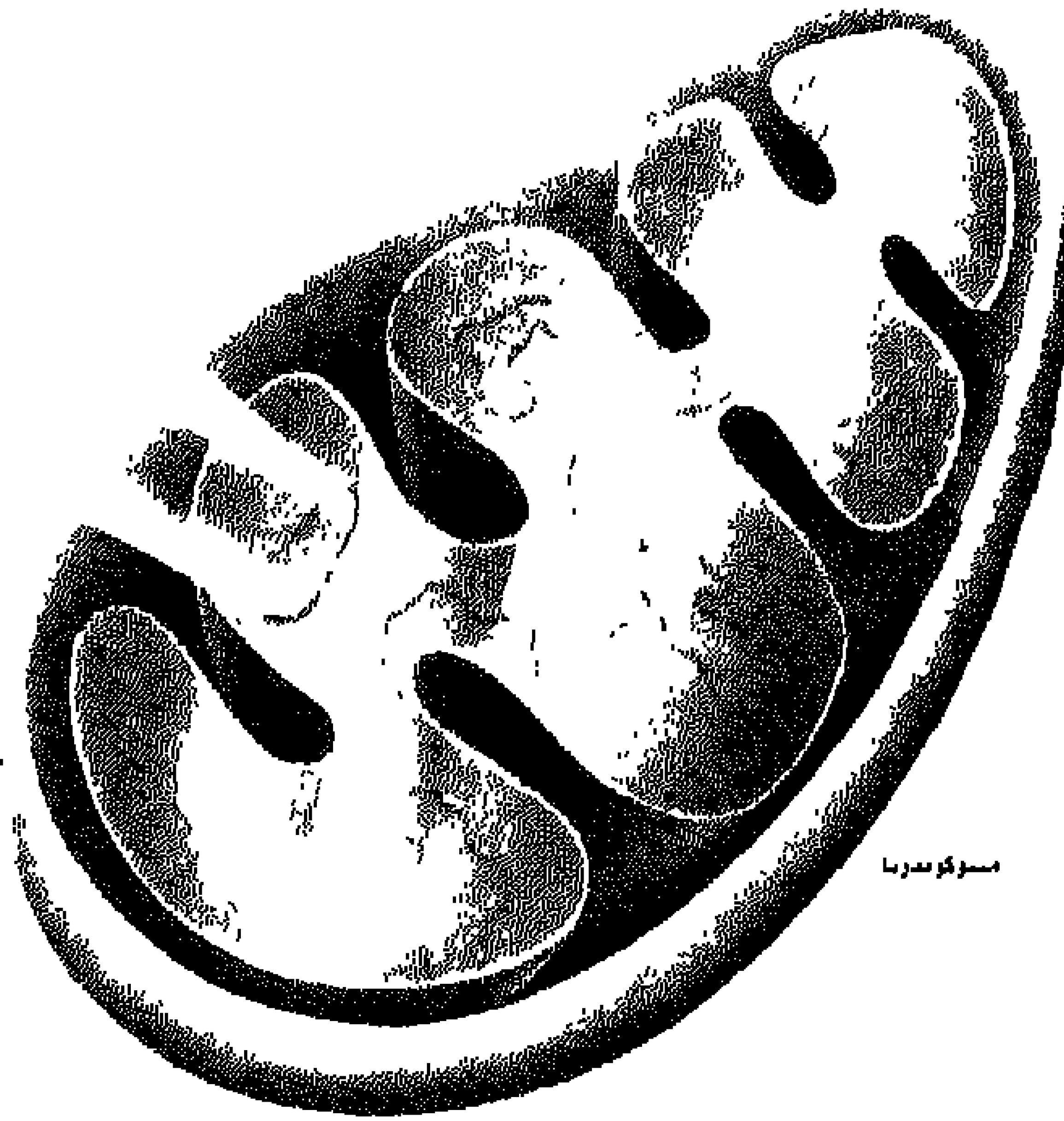
إن عيوب الدنا اللاصبغي[3] ــ الموجود في بنى خلوية تعرف بالميتوكوندريات ــ تسبب عدداً من الاضطرابات، وقد يُضعف الكثير منها الكهول.

(س.د. ولاس)



إن كل خلية من خلايا الجسم تحوي مئات الميتوكوندريات، التي تُعد بحق مصانع لتوليد طاقة الخلايا. وتوجد في كل ميتوكوندريا كثرة من عرى الدنا DNA، تضم كل عروة منها 37 جيناً ذا علاقة بتوليد الطاقة. وتورث طفرات جينات الميتوكوندريات من قبل الأم فقط وغالباً ما يرتبط حدوث هذه الطفرات باضطرابات تنكسية، تكون أحياناً مدمرة وتصيب الدماغ والعضلات خاصة. ويُظهر تفرّس (مسح) الدماغ brain scan (في اليمين) نمطاً شائعاً من أنماط الأمراض التي يسببها دنا الميتوكوندريات: ويُحدث تنكساً في العقد القاعدية (الناحية المؤطرة بالأحمر)، وهي باحات (مناطق) دماغية مهمة في تنسيق الحركات.







طفل عمره خمس سنوات، كان يبدو معافى، أخذ يفقد سمعه لأسباب يتعذر تفسيرها، ثم صار أصمّ كلياً قبل أن يبلغ الثامنة عشرة. وفي غضون ذلك تمّ تشخيص حالته بأنه مفرط النشاط Hyperactive و أنه يعاني نوبات عرضية. وما إن بلغ الثالثة والعشرين حتى بدأت رؤيته تضعف، وأصيب بالسّادّ (الماء الأبيض) Cataract وبالزَّرَق (الماء الأزرق) Glaucoma وبتردٍّ متفاقم Progressive Deterioration للشبكية Retina، وعانى ذلك الفتى طوال خمس سنوات نوبات وخيمة، ووهنت كُلْيَتاه، ثم توفي وهو في الثامنة والعشرين من اختلال Disorder كليتيه ومن عدوى جهازية (عامة).

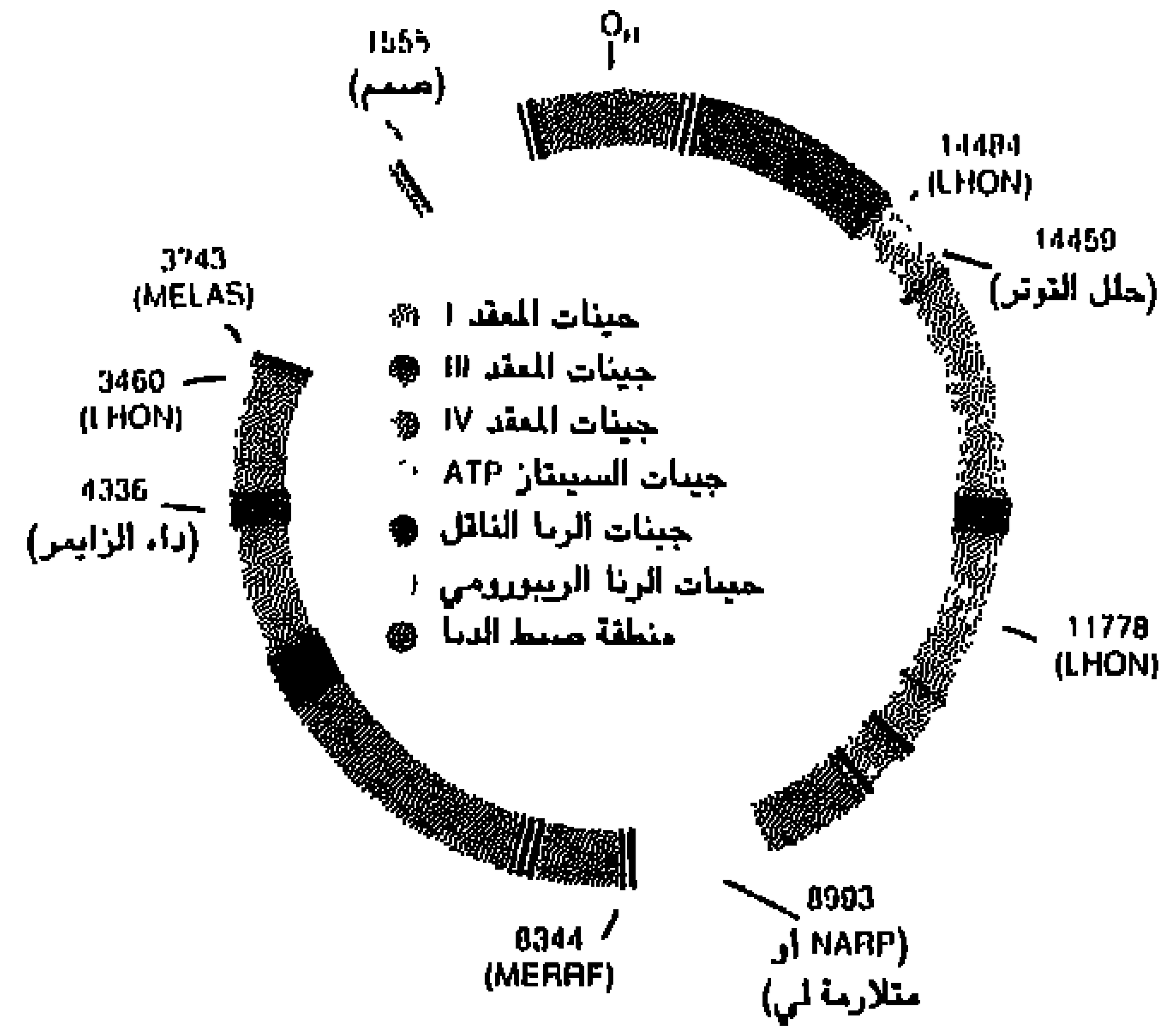
إن سبب هذه المشكلات كلها عيب دقيق جداً في جينات هذا الصبي، ولكن ليس في الجينات المألوفة التي تستقر في الخيوط الطويلة الخطية من دنا DNA الصبغيات (الكروموسومات) التي تحتل نواة كل خلية من الخلايا. بل إنه توفي نتيجة شذوذ في دوائر صغيرة جداً من الدنا الأقل شهرة والذي يتوضع في ميتوكوندرياته،

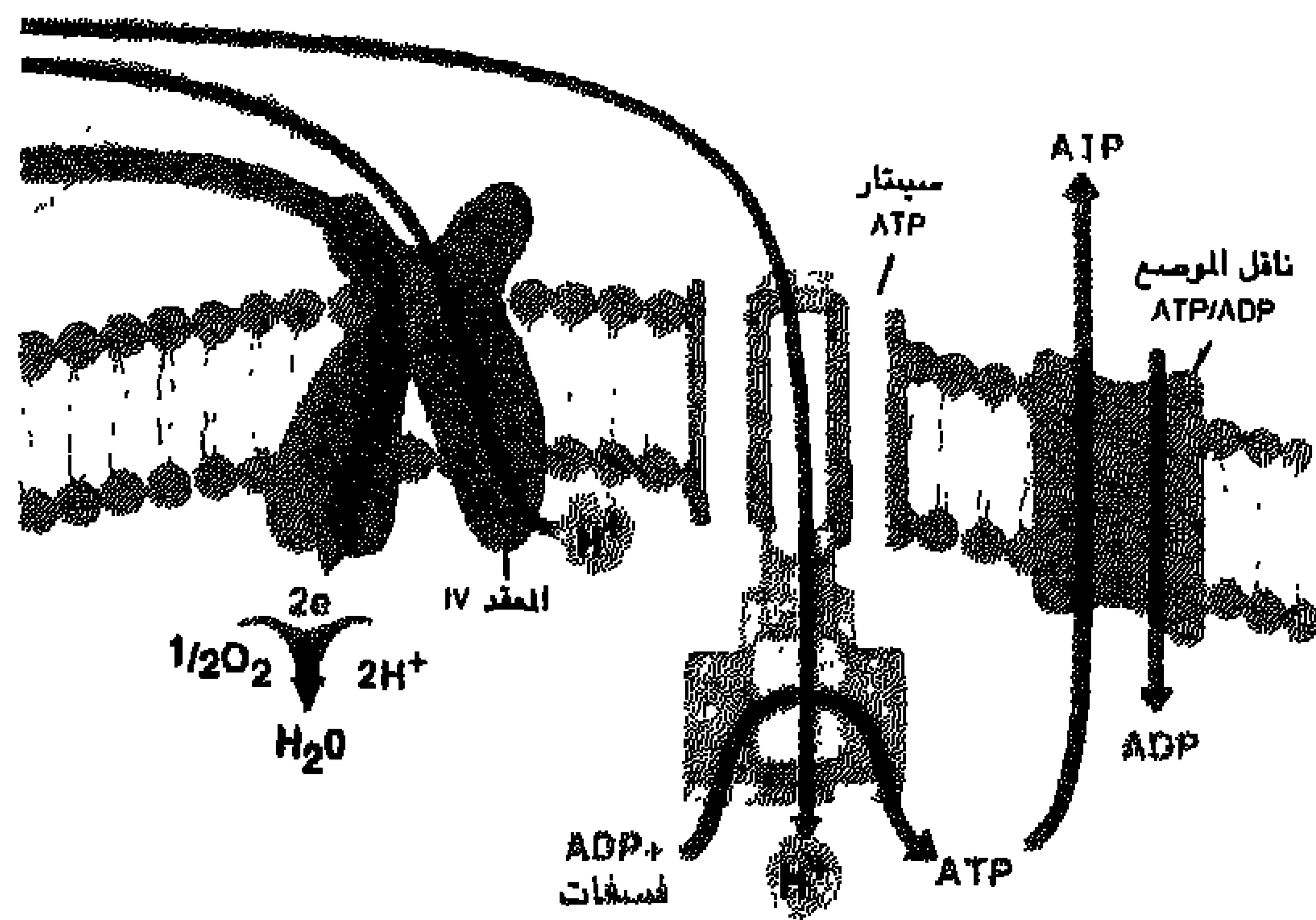
---

(1) DNA.

(2) إن ترجمة المصطلح Mitochondria تستثير ــ لأسباب جوهرية ــ أشكالاً مختلفة من التعابير: مُتَقَدّرات أو كوندريات (حيث يحافظ على الجذر الأساسي)، ولكن منعاً للالتباس مع الجذر Chondri (غضروف أو غضروفي)، آثرنا تعريباً كاملاً لهذا المصطلح: ميتوكوندريات، ومفردها ميتوكوندريا.

(3) الدنا الموجود خارج الصبغيات.





وهي مصانع لتوليد طاقة الخلايا. وتحوي كل دائرة من هذه الدوائر المخططات الوراثية لسبعة وثلاثين جزيئاً تحتاج إليها الميتوكوندريات لتوليد الطاقة.

وفي عام 1963 اتضح للعلماء أن الميتوكوندريات، في الحيوانات كافة، تؤوي جيناتها الخاصة بها، بيد أن الصلة بين أخطاء هذه الجينات وبين اعتلالات بشرية معينة لم تتضح إلا في عام 1988. ففي ذلك العام اقتفينا – في مختبري بجامعة إموري – أصل شكل من أشكال العمى الذي يصيب البالغين الشباب، ويعرف باعتلال ليبر العصبي البصري الوراثي Leber's Hereditary Optic Neuropathy ويوجد في كثرة من العائلات، اقتفيناه إلى طفرة صغيرة موروثة في جين ميتوكوندري. وفي الوقت نفسه تقريباً أقام (ج. هولت) و(أ. هاردينك) و(ج. موركان – هيوز) (من معهد طب الجهاز العصبي في لندن) الصلة بين خَبْن (فقد) Deletion قطع كبيرة نسبياً من جزيء الدنا الميتوكوندري وبين اضطرابات عضلية متفاقمة Progressive.

ويعرف الباحثون في جامعة إموري وفي غيرها أن العيوب التي تحدث في دنا الميتوكوندريات تتسبب في إحداث طيف واسع من الاضطرابات، أو تسهم في حدوثها. ومع أن بعض هذه الاضطرابات لايزال غامضاً، فإنه مأساوي الاحتمالات. وقد يكون من المفيد عموماً التأكيد على أن لطفرات دنا الميتوكوندريات دوراً في بعض من حالات الداء السكري وقصور القلب، وربما في الكثير منها. وعلاوة على ذلك، فإن براهين متلاحقة تشير إلى أن إصابة جينات الميتوكوندريات قد تفاقم سيرورات الشيخوخة (الكِبَر) Aging، والعلل التنكسية المزمنة التي تغدو شائعة في أواخر العمر، كداء ألزايمر مثلاً واضطرابات حركية مختلفة.

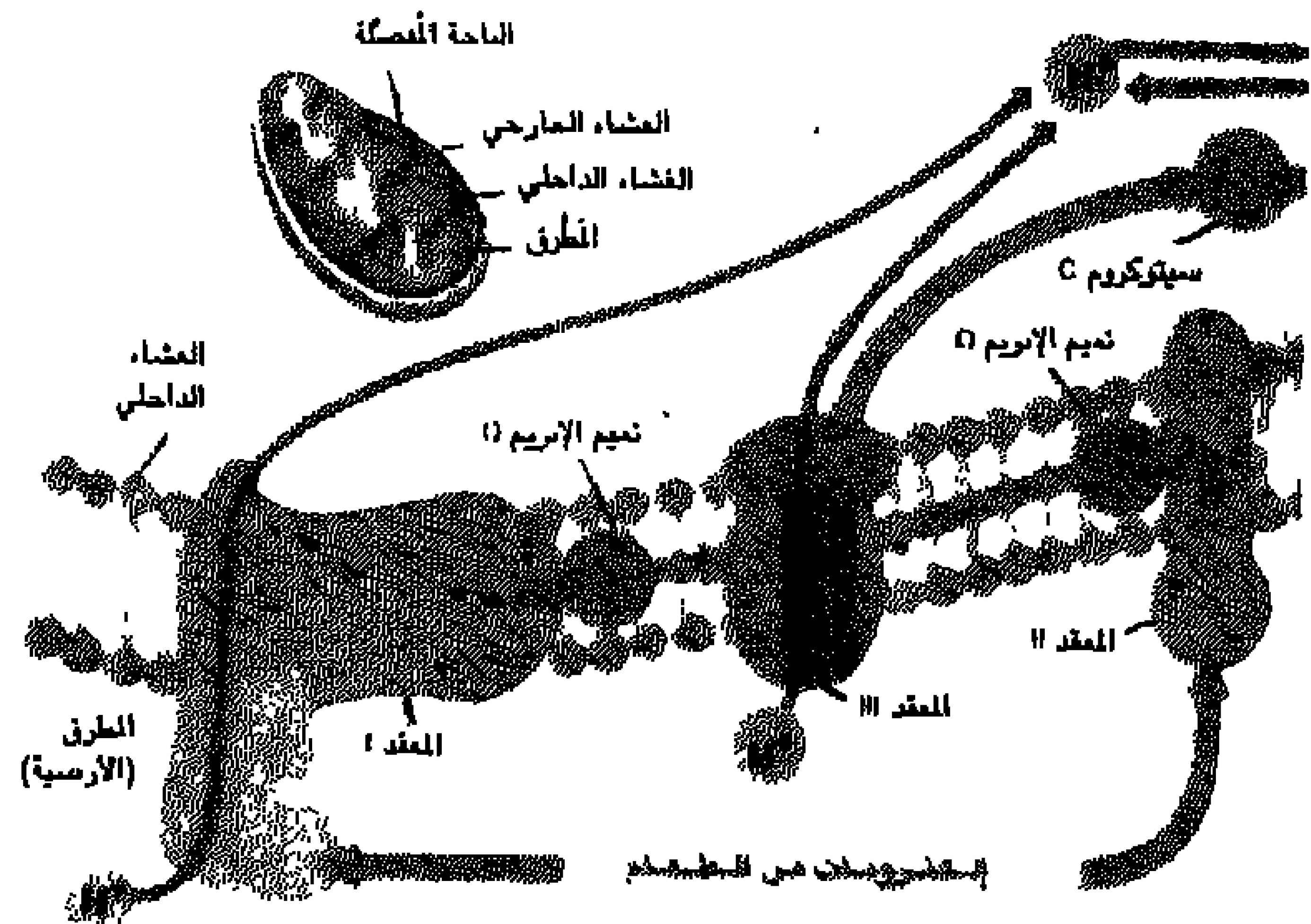
كذلك يجتذب دنا الميتوكوندريات الاهتمام حالياً لأسباب أخرى. فلقد تمكّن العلماء – عن طريق مقارنة تسلسلات أزواج القواعد (أي «الدرجات» المتغيرة، أو الوحدات المكوِّدة الموجودة على «سلم» الدنا المعتاد) في دنا الميتوكوندريات لتجمعات (عشائر / جمهرات) مختلفة من البشر عبر الكرة الأرضية – من الحصول على معلومات مثيرة تتعلق بتطور وهجرة الإنسان الحديث (المعاصر). كما أن باحثي الطب الشرعي قد توصلوا إلى طريقة مقارنة شديدة الدقة، يفيدون منها في تحديد هوية أشلاء الجنود الذين فُقدوا في المعارك، وكذلك من مضى على موتهم زمن طويل، وفي تقرير ما إذا كان المتهم في ارتكاب جريمة ما مذنباً فعلاً.

ومع أن معظم البيولوجيين لم يهتموا كثيراً حتى عهد قريب بدنا الميتوكوندريات، فقد يكون بإمكانهم التنبؤ بأن لطفرات هذه المادة الوراثية عواقب مختلفة في إحداث بعض أمراض الإنسان. وتزوِّد الميتوكوندريات الخلايا (وبالتالي النسج والأعضاء والجسم ككل) بتسعين في المئة تقريباً من الطاقة التي تحتاج إليها لتنجز وظائفها.

وتولِّد الميتوكوندريات الطاقة عبر سيرورة معقدة، تشتمل على ترحيل عدد من الإلكترونات عبر سلسلة من المعقدات البروتينية، تعرف في جملتها بالسلسلة التنفسية. إن هذا الترحيل يمكِّن، على نحو غير مباشر، معقداً آخر (هو الإنزيم سينتاز ATP) من تكوين ATP (ثالث فسفات الأدينوزين)، وهو الجزيء الذي يحمل الطاقة للخلايا.

في البداية، أوحى منطق الأمور بأن أي خلل وخيم يصيب إنتاج المركب ATP في الميتوكوندريات قد يؤذي الخلايا، بل ربما يقتلها، الأمر الذي يخل بوظائف النُسج ويُحدث أعراضاً مرضية. وبالفعل، في عام 1962 أفاد (ر. لوفت) ومساعدوه (في معهد كارولينسكا وفي جامعة استوكهولم) أن الإخلال بإنتاج الميتوكوندريات للطاقة يؤدي إلى اضطرابات مضعفة للجسم. وغدا واضحاً فيما بعد أن أكثر النسج والأعضاء تأثراً بانخفاض مستوى الطاقة الخلوية هو الجهاز (الجملة) العصبي المركزي، وتلا ذلك – حسب ترتيب درجة الحساسية – القلب ثم العضلات الهيكلية والكُلْيتان، وأخيراً النسج المنتجة للهرمونات.

وفي البداية، اتجه العلماء في بحثهم عن تفسير لاضطراب الميتوكوندريات إلى طفرات قد تحدث في جينات النواة، ذلك أن بعضها مسؤول عن تركيب جزء من مكوِّنات الميتوكوندريات. بيد أنه منذ مطلع الثمانينيات تيقن الباحثون أن دنا الميتوكوندريات يكوِّد



لماذا الحاجة إلى دنا الميتوكوندريات؟

تنتج الميتوكوندريات الطاقة بترحيلها إلكترونات الطعام (الأسهم البرتقالية ضمن المخطَّط في اليسار) عبر السلسلة التنفسية، التي هي مجموعة من المُعقّدات البروتينية (رقمت من 1 إلى 1V) وتوجد في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. وتتآثر في المعقد V1 الإلكترونات مع الأكسجين وبروتونات الهيدروجين (H^+) لتشكّل الماء. وتستعمل الميتوكوندريات الطاقة المحرّرة من أكسدة الهيدروجين لتضخ البروتونات (الأسهم الرمادية) عبر الغشاء الداخلي، والشحنة الناتجة، وكذلك التفاضل الكيميائي. يمكّنان معقدا آخر، هو سينثاز ATP، ليكوّن ATP (ثالث فسفات الأدينوزين) وهو الجزيء الحامل للطاقة. إن دنا الميتوكوندريات يحدّد بجيناته 13 بروتينا من معقدات السلسلة التنفسية؛ ولقد لُوّنت النواحي المشتملة على هذه البروتينات بلون زاه. إن الدنا الذي تم ترسيمه في اليمين، يلشئ أيضاً 24 نوعاً من جزيئات الرنا RNA، تستعمل لتكوين هذه البروتينات. لقد رقمت كل كتلة بنائية (زوج قاعدي) في دنا الميتوكوندريات بعكس اتجاه عقارب الساعة، بدءا من الموضع المرسوم بالرمز O_H. كذلك عيلت بعض مواضع الطفرات المسببة للأمراض.

عدداً من الجزيئات المهمة. فهو يحدّد بنية 13 بروتيناً (أي سلاسل من الحموض الأمينية) ستصبح فيما بعد وُحَيْدات في جزيء سينتاز ATR وفي معقَّدات السلسلة التنفسية، كما أنه يحدّد 24 جزيئاً من الرنا RNA تساعد على تصنيع هذه الوحيدات ضمن الميتوكوندريات. ولقد فسرت هذه البيانات (المعطيات) على أن الطفرات التي تحدث في دنا الميتوكوندريات والتي تعطل بروتينات أو أنواع الرنا الميتوكوندرية، يمكنها أن تُحدث خللاً في قدرة الميتوكوندريات على إنتاج الطاقة، وبالتالي إحداث المرض؛ وهي شكوك أكّدتها تقارير عام 1988.

قواعد Rules وراثية شاذة:

ومنذ عام 1988، كشف الباحثون ملامح استثنائية عديدة لمتلازمات (تناذرات) Syndromes تنشأ عن عيوب تصيب دنا الميتوكوندريات. فعلى سبيل المثال، هذه الأمراض غالباً ما تكون موروثة ولكن ليس بالطريقة نفسها التي تورث بها الاضطرابات الناجمة عن طفرات تصيب جينات النواة.

إن السيرورات المعروفة التي تحكم توريث الأمراض الجينية النووية تبدأ، بطبيعة الحال، مع إخصاب النطفة للبيضة. والجنين ذو الخلية المفردة، الذي ينبثق عن هذا الاتحاد، يمتلك نواة منفردة تحتوي على مجموعتين متقابلتين من الصبغيات التي تحمل الجينات. وتشتمل إحدى المجموعتين على مئة ألف جين تقريباً، تتوزع ضمن نحو ثلاثة بلايين زوج من القواعد (الأسس) Bases، وهي تعود إلى أحد الوالدين، في حين تأتي المجموعة الثانية من الوالد الآخر. وتتضاعف هذه الخلية والخلايا المتحدّرة منها تضاعفاً مستمراً كي تشكل الطفل المكتمل المتنامي. وقبل أن تنقسم الخلية، تضاعف صبغياتها بحيث تورث كلاً من الخليتين الوليدتين (البنتين) مجموعة متكاملة من صبغيات الأم وصبغيات الأب. وهكذا، فإن كل خلية في الجسم تحوي جينات مثيلة، وبالتالي طفرات مثيلة.

أمراض دنا الميتوكوندريات

يبين هذا الجدول بعض الاضطرابات التي تسببها طفرات في دنا الميتوكوندريات. كما قد تنشأ حالات معينة من هذه الاضطرابات نتيجة طفرات نووية Nuclear أو من سيرورات أخرى تعرقل وظيفة الميتوكوندريات.

الاضطراب	الملامح
داء ألزايمر	فقدان متفاقم للقدرة الاستعرافية (الإدراكية)
CPEO (شلل العين المتفاقم الخارجي المزمن)	شلل عضلات العين واعتلال عضلي ميتوكوندري *النظر في الأسفل*
الداء السكري	مستويات مرتفعة لكلوكوز الدم تؤدي إلى مضاعفات متباينة
خلل التوتر dystonia	حركة شاذة تشتمل على صمل (تصلب) عضلي، كثيراً ما يترافق مع تنكس العقد القاعدية للدماغ
kss (متلازمة كيرنز ـــ ساير)	CPEO مصحوب باضطرابات معينة، مثل تردّي الشبكية ومرض القلب وفقدان السمع والداء السكري وقصور الكلية
متلازمة لي	فقدان متفاقم للمهارات الكلامية والحركية وتنكس العقد القاعدية؛ مرض كامن مميت يصيب الأطفال
LHON (اعتلال ليبر العصبي البصري الوراثي)	عمى دائم أو مؤقت ينجم عن أذية العصب البصري
MELAS (اعتلال عضلي دماغي ميتوكوندري، حماض لاكتي (لبني)، عوارض شبيهات بالسكتة الدماغية)	خلل في وظيفة النسيج الدماغي (غالباً ما يُحدث نوبات وشللاً موضعياً عابراً وخَرَفاً) يتضام مع اعتلال عضلي ميتوكوندري *انظر في الأسفل* ، وارتفاع سامّ للحموض في الدم
MERRF (صرع رمعي عضلي Myoclonic Epilepsy ألياف حمر ممزقة)	نوبات مصحوبة باعتلال عضلي ميتوكوندري *انظر في الأسفل* قد يشتمل على فقدان السمع والخرف.
اعتلال عضلي ميتوكوندري	تردّي العضلات؛ وهذا يتضح في الضعف العام وعدم تحمل التمارين الرياضية؛ وغالباً ما تُبدي العضلات ألياًفا حُمْراً ممزقة مملوءة بميتوكوندريات شاذة، تصبح حمراء اللون لدى تلوينها بصبغ معين.
NARP (ضعف عضلي عصبي المنشأ، رنح، التهاب الشبكية الصباغي)	فقدان قوة العضلات وتناسقها، مصحوبا بتنكس الدماغ وتردي الشبكية.
متلازمة بيرسون	خلل وظيفي لنقي (نخاع) العظم يبدأ منذ الطفولة (ويؤدي إلى فقدان خلايا الدم)، قصور بنكرياسي؛ والناجون من الموت كثيراً ما يصابون بمتلازمة كيرنز ـــ ساير.

استخدام دنا في الميتوكوندريات أداة شرعية

في 1996/9/3 أدين في ولاية تنسي رجل عمره 27 عاماً بتهمة قتله طفلة عمرها أربع سنوات. وقد ارتكزت إدانته بصورة أساسية على قوة البرهان لتحليل قوبل فيه دنا الميتوكوندريات لخلايا لعابه بما يماثله من خلايا شعر عثر عليه عالقاً بالضحية. وهذه هي الحالة الأولى التي يسمح فيها باستعمال دليل من الميتوكوندريات في المحكمة.

كذلك يتزايد استعمال اختبارات دنا الميتوكوندريات في تحديد هوية بقايا بشرية. فمثلاً، ترعى حكومة الولايات المتحدة برنامجاً يهدف إلى تعرف شُدف هيكلية لجنود ماتوا في نزاعات تعود إلى الحرب الكورية في أوائل الخمسينيات. وأثبتت دراسات أخرى أقل إثارة للحزن أن عظاماً — أخرجت في روسيا عام 1991 — تعود للقيصر نيقولا الثاني، وأن الشخص الذي دفن في الشهر 1882/4 على أنه(ج. جيمز) كان فعلاً هو اللص الأسطوري. (وهكذا اتضح أن الرجال الآخرين الذين زعموا أنهم (ج. جيمز) كانوا مجرد محتالين مدّعين).

ويُجري العلماء الاختبار بمقارنتهم تسلسلات من أزواج القواعد في جزيئات دنا من الميتوكوندريات وبخاصة في منطقة الضبط Control Region المجردة من الجينات. وتتفاوت عادة هذه التسلسلات بين شخص وآخر في مواضع كثيرة. فإذا لم تُظهر جزيئات دنا من الميتوكوندريات خلايا شعرة — مثلاً وُجِدت على ضحية قتل أو اغتصاب — أي اختلاف عن جزيئات دنا من ميتوكوندريات مهاجم متهم، فإن الاحتمال بأن الشعرة قد أتت من ذلك المتهم سيكون احتمالاً قوياً. وبالمثل، إذا كان دنا ميتوكوندريات شقيقه أو شقيقته أو حتى أحد أقربائه، فبإمكان الباحثين أن يستنتجوا بأن البقايا تخص فرداً من أفراد هذه العائلة.

ومازال من الأفضل إجراء مقارنة بجزيئات دنا النَّوى في حال توافر كمية كافية منه، ذلك أنه تسهل إقامة أوجه تماثل أو تفاوت واضحة. ولكن في كثرة من الحالات، تفتقر النسج المتاحة (كخصل الشعر والعظام الصلبة وكذلك الأسنان) إلى دنا النوى يصلح للتحليل، بيد أن هذه النسج تحوي كميات وفيرة من دنا الميتوكوندريات.

وعلى النقيض من ذلك، فإن الجينات الممتدة على طول أزواج قواعد (أشفاع أسس) كل دائرة من دوائر دنا الميتوكوندريات، والبالغ عددها 569 16 زوجاً، يتم توريثها من الأم فقط عبر الميتوكوندريات الموجودة في البيضة، ولا تسهم النطفة بأي شيء فيها. أضف إلى ذلك، أن البيضة المخصبة، وكذلك جميع خلايا الجسم المتحدرة منها، لا تحوي ميتوكوندريا واحدة فقط، بل مئات الميتوكوندريات، وأن كل ميتوكوندريا تمتلك عدداً كبيراً من جزيئات الدنا الميتوكوندري. ومع أن الخلية الواحدة تضاعف تقريباً عدد الميتوكوندريات التي توجد فيها، وكذلك جزيئات الدنا الميتوكوندري قبل كل انقسام، وتزود الخليتين الوليدتين بعدد متساوٍ تقريباً من الميتوكوندريات، فإن الخلية الأم لا تعيّن نوعياً أياً من الميتوكوندريات سيؤول إلى أي من الخليتين الوليدتين (البنتين).

وهكذا، فإذا ما حازت بيضة مخصبة طفرة في جزء من دنا ميتوكوندرياتها (وهذا ما يُعرف بالتغاير البلازمي heteroplasmy)، فإن خلية وليدة واحدة قد ترث حصة أكبر من الميتوكوندريات حامل الطفرة، في حين أن الخلية الأخرى قد ترث نسبة أكبر من الميتوكوندريات ذات جزيئات الدنا السوي. وتوضح قوانين الاحتمالات أنه في الخلايا التي تستمر في الانقسام، تنزع تجمعات الدنا الميتوكوندري في الخلايا الولائد (البنات) المنبثقة عن هذا التوالد إلى الاتساق (التماثل البلازمي homoplasmy)، لتحوز إما غالبية من جزيئات الدنا السوية وإما غالبية من جزيئات الدنا الطافرة.

فالطفل الذي تشكّل من بيضة متغايرة البلازمية سيمتلك إذاً بعض النسج الغنية بجزيئات سويّة من الدنا الميتوكوندري ونسجاً أخرى غنية بجزيئات الدنا الطافر. وعلاوة على ذلك، فإن بيوض المرأة ذات التغاير تتفاوت فيما يتعلق بالنسبة المئوية لدنا الميتوكوندريات الطافر، فأطفالها يتفاوتون إذاً تفاوتاً واضحاً في محتوى نسجهم من الجزيئات، وكذلك في وخامة (بل حتى في نوعية) الأعراض التي يظهرونها. بيد أن الأفراد الذين يعتلّون نتيجة طفرة مثلية البلازمية سيُظهرون أعراضاً متشابهة.

أمراض ذات ملامح مدهشة

وكثيراً ما تكون الأمراض الناجمة عن عيوب في دنا الميتوكوندريات موروثة، ولكنها قد تنشأ أحياناً على نحو تلقائي، إما في البيضة نفسها وإما في المراحل المبكرة للتنامي الجنيني. فطفرات هذه المراحل، شأنها شأن الطفرات الموروثة، تنتشر في الجسم (مع تنامي الجنين) انتشاراً واسعاً؛ وقد تُحدِث، والحالة هذه، تأثيرات عميقة. وقد تنشأ أيضاً طفرات دنا الميتوكوندريات في النسج طوال حياة الفرد، مع إمكان حدوث طفرات متباينة في خلايا مختلفة، بل حتى في جزيئات معينة من دنا ميتوكوندريات الخلية الواحدة. ويطلق على هذه التغيّرات اسم الطفرات الجسدية Somatic Mutations.

وقد يفسِّر تراكم الطفرات الجسدية نوعين من الملامح التي كثيراً ما لوحظت في الأمراض الموروثة في جزيئات دنا الميتوكوندريات. فغالباً ما يعتلّ الأفراد الذين ولدوا بطفرات في دنا الميتوكوندريات بعد انقضاء سنوات، أو حتى بعد عقود في بعض الأحيان، على ولادتهم، وتسوء حالتهم عادة مع الزمن. ولقد اقترحتُ وزملائي أن كثرة الطفرات الموروثة في دنا الميتوكوندريات تؤثر في وظيفة هذه البُنى تأثيراً لطيفاً خفياً، إذ تتيح لنُسُج الجسم كافة أن تنتج ما تحتاج إليه من الطاقة، على الأقل لفترة من الزمن. بيد أن تراكم الطفرات الجسدية العشوائية في أثناء حياة الفرد يخفض إنتاج الطاقة في نسج معينة حتى يهبط إلى مستوى يتعذر معه استمرار إنجاز الوظائف إنجازاً سوياً. وتبدأ النسج عندئذ بتأدية وظائفها على نحو خاطئ، فتظهر الأعراض المَرَضية. ومع تزايد تراكم الطفرات الجسدية، يستمر إنتاج الطاقة في الهبوط، الأمر الذي يؤدي إلى تفاقم الأعراض.

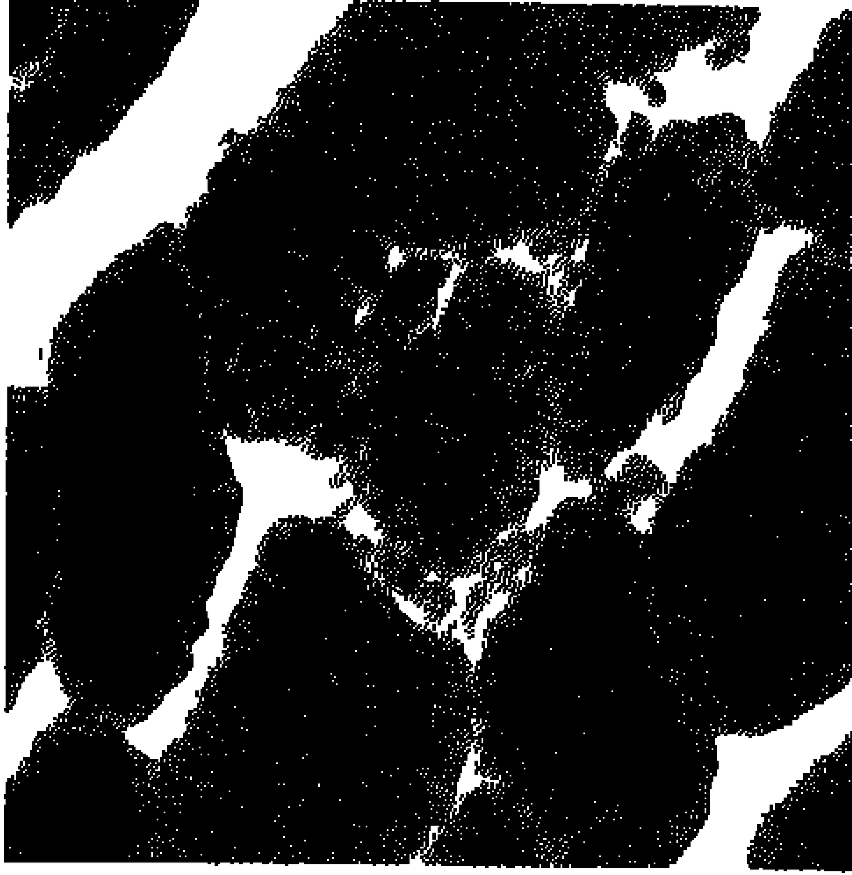
وفي الواقع، تسهم الطفرات الخلْقية والجسدية، فيما يبدو، في نشوء الأمراض بطرائق أكثر عمقاً من مجرد التخفيض المباشر لإنتاج الطاقة. فإسهام السلسلة التنفسية في إنتاج الطاقة يؤدي إلى انطلاق جذور الأكسجين الحرة (الطليقة) Oxygen Free Radicals كنواتج ثانوي سام. وتهاجم هذه المشتقات الأكسجينية ـــ التي تحمل إلكتروناً غير مزدوج Upaired، ومن ثم تكون شديدة الفاعلية ـــ المكونات الخلوية جميعها، بما في ذلك بروتينات السلسلة التنفسية ودنا الميتوكوندريات. إن كل ما يعوق تدفق الإلكترونات عبر السلسلة التنفسية يزيد من نقل جزيئات الأكسجين، ويعزّز بالتالي من توليد الجذور الحرة. ويمكن الافتراض إذاً أن طفرة منفردة تستطيع أن تستهل دورة متواترة لنقل إلكتروني مُثبَّط، الأمر الذي يؤدي إلى تزايد إنتاج الجذور الحرة وإلى مزيد من طفرات دنا الميتوكوندريات.

وكقاعدة عامة، فإن طفرة وخيمة في دنا الميتوكوندريات ـــ طفرة تكبت إنتاج الطاقة إلى درجة ينشأ معها في بداية الأمر مرض مهدِّد للحياة ـــ ستغدو طفرة متغايرة البلازمية؛ أي إن الجين الطافر سيكون موجوداً في نسج المريض جنباً إلى جنب مع النسخة السويّة للجين. وسبب هذا الطراز من التوريث أن الطفرات المثلية البلازمية الوخيمة (أي الطفرات التي توجد في كل نسخة من نسخ جين معين وفي النسج كافة) ستخفض من إنتاج الطاقة تخفيضاً بعيد الأثر، إلى درجة تصبح فيها الطفرة مميتة للجنين قبل ولادته، وهذا هو سبب عدم العثور على هذا الطراز الوخيم عند أي واحد من المرضى. وبالمقابل، عندما تحدث طفرة متغايرة البلازمية، فإن النسخ السوية للجين الطافر ستقدم من الطاقة ما يكفي المرء البقاء على قيد الحياة في مرحلة الطفولة أو ما بعدها. وتنجم الأمراض الأقل وخامة من طفرة، إما متغايرة البلازمية أو مثلية، تسبب هبوطاً طفيفاً في إنتاج الطاقة.

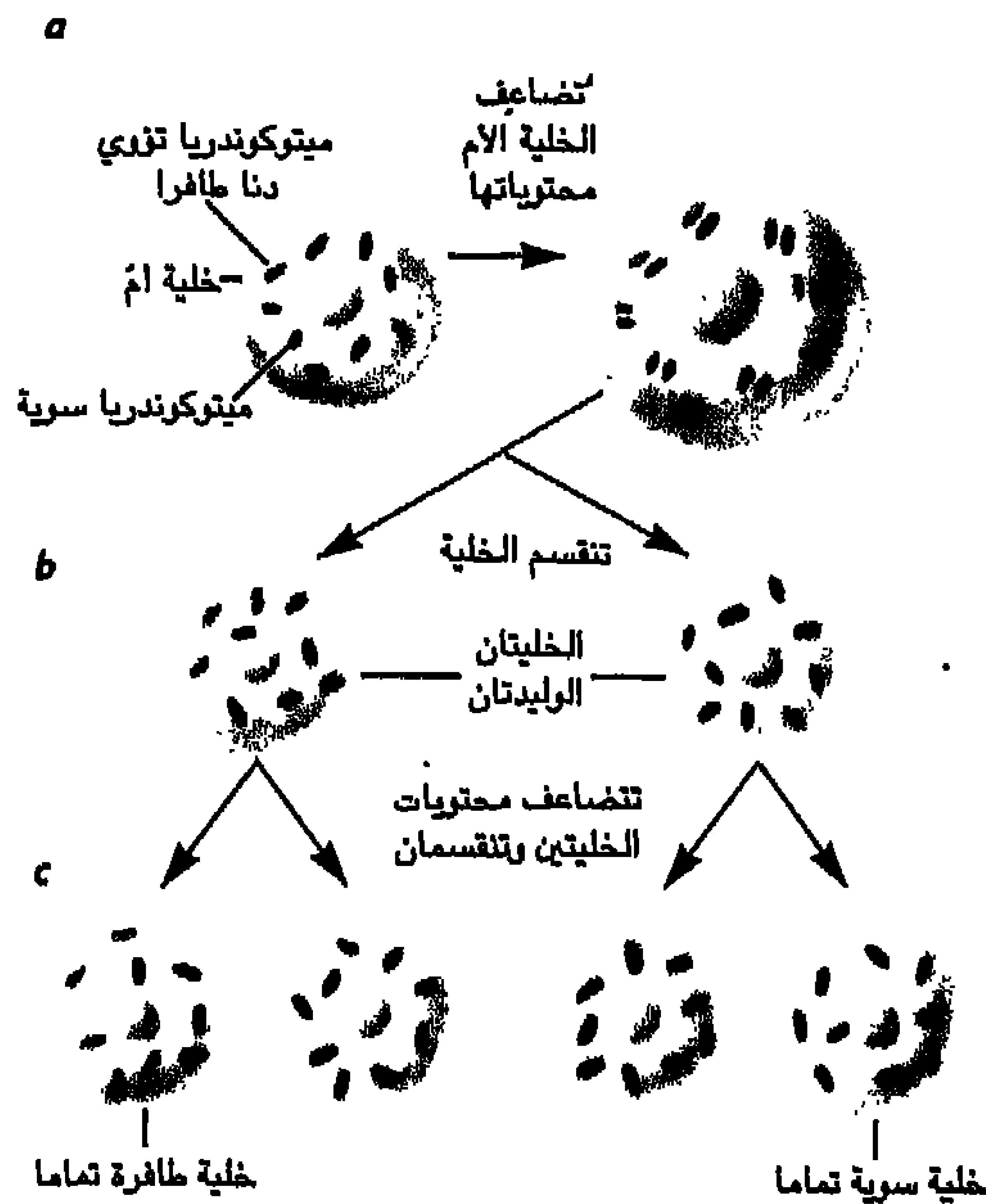
طفرات بسيطة وتأثيرات قوية

فيما تبقى من هذه المقالة، سأعمد إلى سرد أمثلة عن اضطرابات تنشأ نتيجة طفرات موروثة (جنينية) في دنا الميتوكوندريات. ومع أن لهذه الاعتلالات أسماء مألوفة، فإن دراستها قدمت معارف مهمة عن كيفية إحداث طفرات دنا الميتوكوندريات للأمراض. وسألخص بعد ذلك النظريات الحالية حول الاحتمال المقلق بأن للطفرات الموروثة والجسدية لجزيئات دنا الميتوكوندريات دوراً مهماً في سيرورات الشيخوخة وفي الأمراض الشائعة في مراحل الحياة المتأخرة.

ففي طفرات موروثة مختلفة يحل زوج واحد من القواعد في الجين المكوِّد للبروتين محل زوج آخر، مما يتسبب في وضع حمض أميني خاطئ في البروتين المكوَّد مكان الحمض الأميني الصحيـــح . وتوضـــح إحـــدى هذه الطفرات « المخطئة المعنى » Missense إيضاحاً مدهشاً المبدأ القاضي بأن طفرة متغايرة البلازمية في دنا الميتوكوندريات غالباً ما تعبّر عن نفسها تعبيراً يتفاوت بين فرد وآخر. وتؤدي هذه الطفرة، التي تتناول استبدالاً في الموضع 8993، إلى استبدال حمض أميني بآخر في وُحَيْدة سينثاز ATP (المعقد الذي يصنع المركب ATP).



كثيراً ما تشكل الألياف الحمر الممزقة سمة مميزة للأمراض العضلية الميتوكوندرية. ويتم تعرفها بسهولة باصطباغ ميتوكوندرياتها باللون الأحمر وبضخامتها الشاذة وبتشوه شكلها، حيث تتراكم في الألياف العضلية المتردِّية.



إن الخلية التي تحوي بعض ميتوكوندرياتها جزيئات دنا طافر، وبعضها الآخر جزيئات دنا سوي تماماً (a)، غالباً ما تعطي خليتين «وليدتين» (بنتين) تختلفان عن الخلية الأم، وتختلف إحداهما عن الأخرى، في عدد الميتوكوندريات التي تحوي دناً معيباً (b). وعندما تنقسم الخليتان الوليدتان، تنزع تجمعات دنا الميتوكوندريات فيها إلى التجانس، فتنشأ خلايا جميع كوندرياتها ذات دنا طافر، وخلايا أخرى جميع ميتوكوندرياتها ذات دنا سوي (C). وهذه النزعة نحو الاتساق تحدث في أثناء تنامي الجنين، وكذلك في بيوض أجيال متعاقبة من الإناث، ومن ثم يؤول الأمر إلى وراثة بعض أطفالهن مقداراً أكبر من الدنا الطافر، وتكون أعراض المرض لديهم أسوأ من أمهاتهم.

وفي دراسة تمكنتُ من متابعة أربعة أجيال من إحدى العائلات، تبيّن أن طفرة بعينها تسببت في معاناة عدة أفراد منها تنكساً متوسط الشدة في محيط الساحة (المجال) الإبصارية Visiuntis Field للشبكية (يعرف بالتهاب الشبكية الصباغي Retinitis Pigmentosa)، في حين عانى شخص آخر تنكساً وخيماً في الشبكية وفي الجهاز العصبي المركزي. كما أصيب طفلان سيئا الطالع بمتلازمة لي Leigh Syndrome المميتة. ويتميز هذا المرض المدمِّر بتنكّس سريع نسبياً للعقد القاعدية، وهي ناحية في الدماغ مهمة لتنسيق الحركات. ومن الواضح أن الفروق في أعراض الاعتلالات ضمن هذه العائلة إنما ترجع أساساً إلى التباين في النسب المئوية للجزيئات الطافرة من دنا الميتوكوندريات في نُسُج هؤلاء المرضى. فأصحاب النسب المرتفعة ينتجون كميات أقل من المركب ATP، ويعانون بالتالي إصابات مرضية أشد.

وثمة استبدالات موروثة معينة من القواعد لابد لها من أن تحقق حالة البلازمية المثلية قبل أن تُحدث إشكالات صحية؛ وهذه الطفرات تنتج تأثيرات يمكن التنبؤ بها بثقة أكبر. فالعيوب الوراثية المسؤولة عن معظم حالات اعتلال ليبَر العصبي البصري الوراثي، أو اختصاراً LHON، تقع ضمن هذه الفئة. وتتضح أعراض هذا المرض عادة في بداية سن البلوغ، وذلك عندما تكف الناحية المركزية من العصب البصري عن العمل، مؤدية إلى فقدان الرؤية في مركز الساحة الإبصارية. وتُعدُّ ثلاث طفرات في جزيئات دنا الميتوكوندريات ــ تصيب كلها نقل الإلكترونات في بداية السلسلة التنفسية ــ مسؤولة تآزرياً عن قرابة تسعين في المئة من الحالات المدروسة في شتى أنحاء العالم. وعموماً، فإن المصاب بإحدى طفرتين معينتين من الطفرات الثلاث يعاني فقداناً دائماً للرؤية، أما الأشخاص الذين يحملون الطفرة الثالثة فقط فإنهم يستردون أحياناً بعض قدرتهم على الإبصار.

ويقوم عدد من الطفرات المرَضية المستبدلة للقواعد في دنا الميتوكوندريات بتمزيق جزيئات الرنا التي هي جزء من الآلية التي تستعملها الميتوكوندريات لتكوّن البروتينات. وهكذا، فإن هذه الطفرات تعرقل تركيب كثرة من بروتينات ميتوكوندرية مختلفة في وقت واحد، ومن ثم تخفض إنتاج المركب ATP. ولهذا السبب، فإن الأفراد الذين يولدون مصابين بهذه الطفرات (التي تعرف بطفرات تكوين البروتين) قد يصابون بأمراض خطيرة في عدة أجهزة، بما في ذلك شذوذات الجهاز العصبي المركزي والجهاز العضلي.

والحالة التي وصفتُها في بداية هذه المقالة (وهي حالة شاب قضى نحبه وهو في الثامنة والعشرين نتيجة قصور كلوي وعدوى) تعكس المقدرة الكامنة لطفرات تكوين البروتين على إحداث الوفاة. فلقد هلك ذلك الشاب بسبب طفرة نقطية Point Mutation خَبَلَت (فقدت) فيها قاعدة واحدة من جين جزيء الرنا الناقل. ويأتي هذا الجزيء عادة بالحمض الأميني «ليوسين» إلى البروتينات التي يتم تركيبها في الميتوكوندريات. ويحتمل أن تكون الطفرة قد حدثت في خلايا الخط الإنتاشي (الخلايا الجنسية) للأم، ذلك أن دراسة الخلايا اللاتناسلية (خلايا الدم مثلاً) بينتْ أنها لا تحتوي إلا على دنا ميتودكوندري سوي.

كذلك اتضح أن عشر طفرات أخرى تصيب الجين نفسه، تُحدث طيفاً من الاضطرابات الخطيرة. فمثلاً، ينجم عن حدوث ثلاث من هذه الطفرات اعتلال العضلات الميتوكوندري Mitochondrial Myopathy، وهو شكل من أشكال الضعف العضلي المتفاقم، يتميز بوجود ألياف حمر ممزقة Ragged Red Fibers (ألياف عضلية متنكسة مليئة بميتوكوندريات معيبة شاذة الشكل، تتلون بالأحمر لدى معالجتها بمُلوِّن نوعي). وبسبب عيبان جينيّان من هذه العيوب تضخماً شاذاً وتردياً متفاقماً في العضلة القلبية، ويسمى اعتلال عضلة القلب الضخامي Hypertrophic Cardiomyopathy. وتصيب خمس طفرات أخرى أجهزة متعددة، مسببة مجموعة من الأعراض تعرف جميعاً بالرمز MELAS، اختصاراً للاعتلال العضلي الدماغي الميتوكوندري Mitochondrial Encephalomyopathy وللحُماض اللاكتي Lactic Acidosis وللعوارض الشبيهات بالسكتة الدماغية Strokelike Episodes. إن إحدى الطفرات المحرضة على حدوث أعراض MELAS تعد أيضاً مسؤولة عن قرابة 1.5 في المئة من إصابات الداء السكري، وينشأ هذا الداء حتى ولو وجدت الطفرة في مستويات متدنية.

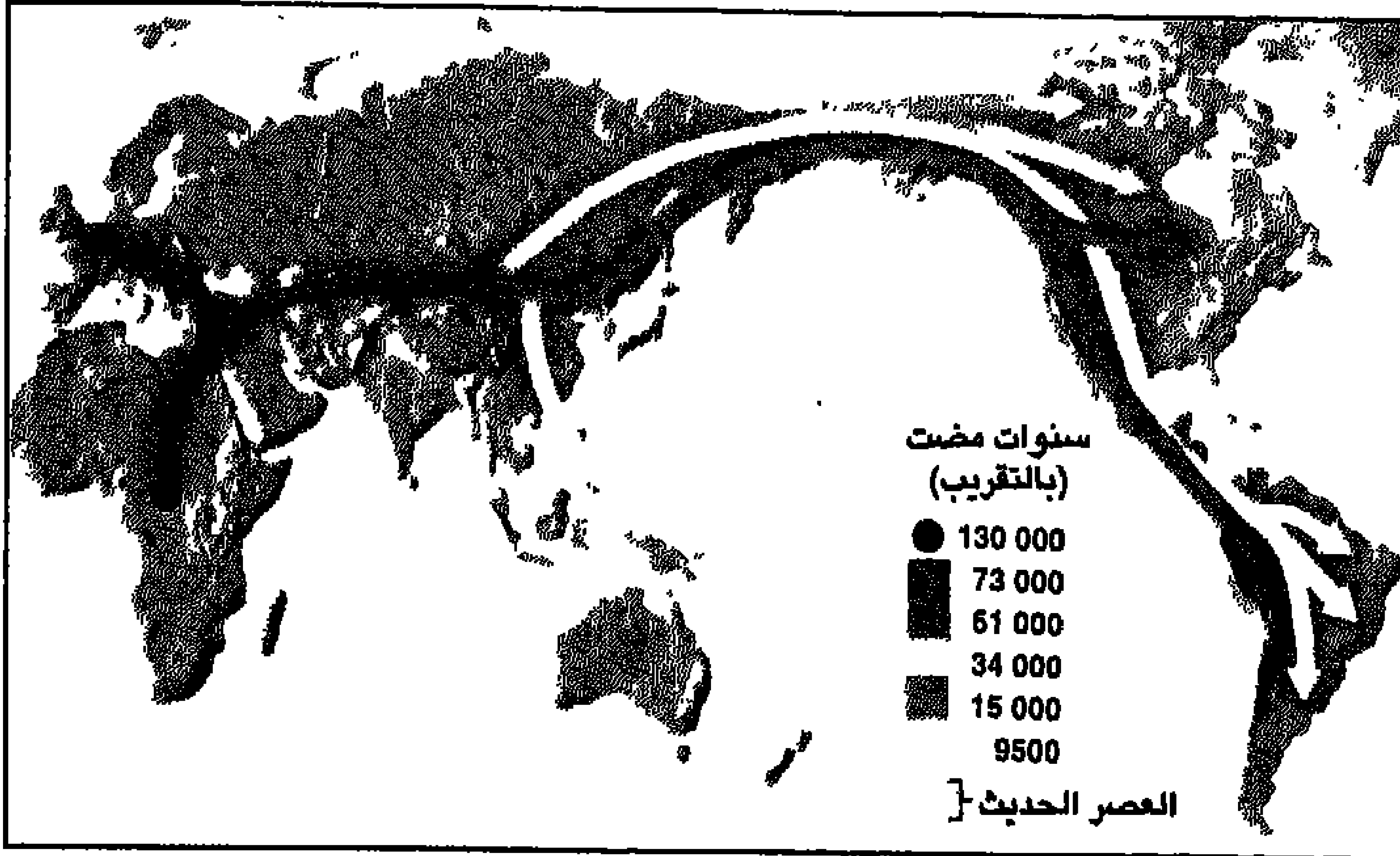
ومع أن كثرة من طفرات تكوين البروتين الموروثة في دنا الميتوكوندريات تكون مميتة في مرحلة الصِّبا، يكون بعضها أكثر اعتدالاً وتظهر أعراضه في مرحلة متأخرة من العمر. فلقد تبين مثلاً أن طفرة في الجين المكود لجزيء الرنا الناقل للحمض الأميني كلوتامين تُصادَف في قرابة 5 في المئة من الأوروبيين الذين يصابون بداء ألزايمر Alzheimer المتأخر الظهور.

كما تم تعرُّف طفرات في دنا الميتوكوندريات تصيب في آن واحد كثرة من الجينات، وذلك بخبن أو مضاعفة قطع كبيرة من المادة الجينية (الوراثية). وكما هي الحال في استبدالات القواعد، تسبب طفرات «إعادة الترتيب» Rearrengement هذه أمراضاً متباينة الخطورة.

تغيرات في الدنا بالجملة

ومن بين الاضطرابات الناجمة عن طفرات إعادة الترتيب، والتي درست أكثر من غيرها، اضطرابان يتميزان بشلل في عضلات العين وبالاعتلال العضلي الميتوكوندري، وهما شلل العين الخارجي المتفاقم المزمن Chronic Progressive External Ophtalmoplegia (الذي يحدث عادة بعد سن العشرين) ومتلازمة كيرنْز ــ سايَر Sayre Syndrome—Kearns (التي تتضح في سن أكبر ويمكن أن تشمل تنكساً في الشبكية واضطرابات قلبية وقِصَرا

ماذا يكشف دنا الميتوكوندريات عن الهجرات البشرية



إن التحاليل المقارنة لجزيئات دنا الميتوكوندريات لأناس من مختلف أرجاء العالم مكنت تشريحياً علماء الوراثة من تتبع الهجرات الرئيسية للإنسان الحديث. كذلك وضعت هذه التحاليل، التي أجريت في عدد كبير من المختبرات (المخابر)، تواريخ تقريبية لأعمار التجمعات السكانية في القارات المختلفة، هذا على الرغم من أن هذه المختبرات تتباين في تأريخاتها، وذلك وفقاً لطرائق الحساب التي تتبعها.

ويوحي السيناريو، الذي وضع على أساس البيانات المستمدة من مختبري، بأن الإنسان العاقل Homo Sapiens نشأ في إفريقيا قبل 13000 عام تقريبـاً. و لقـد نقلت الهجرة الأولى بعض البشر من إفريقيا إلى آسيا (السهم الأحمر على الخريطة) قبل قرابة 73000 عام . وقبل 51000 عام تقريباً غادرت جماعة أخرى الشرق الأوسط وانتشرت في أوروبا (السهم البرتقالي).

وأدت موجات عديدة من الهجرة الأسيوية إلى وصول الإنسان الحديث إلى العالم الجديد. وقبل نحو 34000 عام مضت، عبر بعض البشر المتجولين سيبيريا والاسكا، وهبطوا عبر أمريكيا الشمالية وأمريكا الوسطى إلى أمريكا الجنوبية (الأسهم الصفر). وشكل هؤلاء أسلاف الهنود البدائيين Paleo—Indians ، كقبائل البيما في أريزونا والمايا في المكسيك واليانومامي في فنزويلا. وعبرت من آسيا، قبل 15000 عام تقريباً، موجة ثانية من المهاجرين أطراف سيبيريا، وربما سارت بمحاذاة الشاطئ وذلك قبل أن تصل إلى الاسكا وتتبعثر في أرجاء أمريكا (الأسهم الخضر). واختلط المهاجرون الجدد بالجماعة السكانية الموجودة، لينشئوا الهنود البدائيين مع لغتهم الأمريكية الهندية.

وقبل نحو 9500 عام أتت هجرة من سيبيريا بمؤسسي جماعة النّا — ديه Na—dené ، وهي مجموعة لغوية تشمل القبائل الشمالية الغربية الكندية وقبائل الأثابسك الألاسكية (كقبيلة الدوكريب) والأباش والنافاجو، التي استوطنت جنوب غرب الولايات المتحدة (السهم الأزرق). أما الهجرات التي أتت بقبائل الإسكيمو والألوت إلى أمريكا الشمالية (السهم الرمادي)، وكذلك سكان جزر المحيط الهادي (الأسهم البيض)، فإنها تعد أحدث عهداً، على الرغم من أنها لم تورخ بدقة على أساس بيانات دنا الميتوكوندريات.

ويمكن إعادة بناء الهجرات العالمية بوساطة تحليل دنا الميتوكوندريات، ذلك أنه مع هجرة المرأة من قارة إلى قارة، راكم دنا ميتوكوندرياتها تدريجياً الطفرات غير الممرضة، الواحدة تلو الأخرى.

ونتيجة لذلك، فإن تسلسل أزواج القواعد في دنا الميتوكوندريات في القارة الواحدة أتى مغايراً بطرائق مميزة عن التسلسل المقابل في القارات الأخرى. وبتنسيق التسلسلات المتقاربة في قارة ما في مجموعات فردانية Haplogroups، وبمقارنة هذه المجموعات الفردانية من القارات المختلفة. وبوسع العلماء أيضاً أن يحددوا أي الأراضي اجتيحت قبل غيرها، ذلك أن تزايد تباين التسلسلات في دنا الميتوكوندريات في قارة ما هو دليل على تعمير استيطاني أقدم. فالجماعات الإفريقية تعد الأقدم، ذلك أنها تُؤوي أشد أشكال دنا الميتوكوندريات تغايراً. أما الجماعات السكانية الآسيوية والأوروبية، وكذلك جماعات أمريكا الأصلية، فإنها تبدي، تدرّجياً، تباينات أقل.

أما التاريخ الحقيقي الذي تم فيه اجتياح كل قارة من القارات، فيقدر استنتاجاً فقط. ذلك أن هذا الزمن منوط بالسرعة التي تُراكِمُ فيها جزيئات دنا الميتوكوندريات الطفرات. ومع أن هذه السرعة ثابتة نسبياً، فإنها غير معروفة بدقة. وعلى ما يبدو، فإن الطفرة تحدث مرة كل 2000 إلى 3000 سنة. والتواريخ، التي وردت آنفاً، وُضعت على أساس أن حدوث الطفرة يحتاج إلى متوسط هذين الرقمين.

وفضلاً عن كشفه عن أنماط الهجرات العالمية، يوحي تحليل دنا الميتوكوندريات بأن بدايات نوع الإنسان العاقل أخذت مكان الأنواع البشرية البدائية كافة (كإنسان النيندرتال مثلاً) أينما التقتها هذه البدايات. بيد أن هذا الاستنتاج يعارضه عدد من الأنثروبولوجيين (علماء البشريات). ويرى هؤلاء الباحثون أن أسلاف الإنسان العاقل قد ظهرت في إفريقيا قبل أكثر من مليون عام، ثم انتشرت هذه الأسلاف عبر العالم القديم، وتطورت محلياً إلى الأعراق الرئيسية للإنسان العاقل.

في القامة، وأعراضاً أخرى متباينة). كما تُعدُّ طفرات إعادة الترتيب مسؤولة عن حالات عديدة من متلازمة بيرسون Person's Syndrome، وهي إصابة يخفق فيها الأطفال في صنع خلايا الدم، وتصبح حياتهم معتمدة — منذ مرحلة مبكرة — على نقل الدم، وتضعف وظيفة البنكرياس لديهم. وإذا ما عاش الطفل ، فإنـه في النهاية يعاني شلل العين ومشكلات أخرى تترافق ومتلازمة كيرنز — ساير. ومن المحزن أن المصابين بأي من هذه الاضطرابات يتفاقم اعتلالهم مع الزمن، وفي كثير من الحالات يموتون من قصور تنفسي أو بسبب اختلالات وظيفية جهازية (عامة) أخرى.

وقد تحوي خلايا المصاب بأي من هذه الاضطرابات مزيجاً من جزيئات دنا الميتوكوندريات، بما في ذلك جزيئات مخبونة أو مضاعفة. ولكن ربما حدوث الخبن هو الذي يفسر لماذا يكون المرض خطيراً منذ البداية. فالجزء المفقود من الدنا لابد أن يحتوي على جينات لجزيئات من الرنا الناقل، وكما أشرنا إلى ذلك سابقاً، فهذا يعني أن كثرة من البروتينات المختلفة الضرورية لإنتاج الطاقة إما ألا تكوّن على الإطلاق أو أنها تكوّن على نحو غير ملائم. ويُعتقد بأن تفاقم المرض مع الزمن إنما يحدث، ولو جزئياً، لأن نُسُجاً معينة [كالنسيج العضلي والنسج الأخرى التي تتألف من خلايا قادرة على الانقسام] تنسخ (تُضاعِف) انتقائياً دنا الميتوكوندريات المخبون (الناقص).

ولا يعرف أحد لماذا تُضخَّم نوعياً الجزيئات المخبونة من دنا الميتوكوندريات في النسج التي لا تنقسم خلاياتها. ويفسر الباحثون ذلك بفرضيتين: الأولى أن الجزيئات المخبونة ــ وهي دوائر أصغر حجماً من دوائر الدنا السوية ــ تحتاج كي تنتسخ إلى زمن أقصر، ومن ثم تزداد وفرة. أما الفرضية الثانية فذات علاقة بالتعضّي الداخلي للألياف العضلية؛ ذلك أن كل ليفة تتألف من خلايا عضلية عديدة اندمج بعضها ببعض، فالليفة الواحدة إذاً متعددة النوى. وتشير أدلة مختلفة إلى أن النواة عندما تستبين وجود عوز طاقي في جوارها (كالذي ينجم عن طفرة في دنا الميتوكوندريات)، تحاول أن تعوض عن ذلك العجز في الطاقة باستثارتها نسخ أية ميتوكوندريات قريبة منها. ولسوء الحظ، تحض هذه الاستجابة على نسخ الميتوكوندريات بعينها التي تسببت في حدوث العجز الطاقي الموضعي، مسببة تفاقم المشكلة أكثر فأكثر.

ولقد حيّر العلماءَ لفترة من الزمن أصلُ الخبن الذي يسبب أمراض الميتوكوندريات. فمع أن هذه الاضطرابات تنتقل من جيل إلى آخر، فإنه نادراً ما تورث جزيئات الدنا الميتوكوندرية المخبونة بذاتها. ولعل ذلك يرجع إلى أن الخلية أو الجنين الذي يؤوي عدداً كبيراً من جزيئات الدنا الميتوكوندرية المخبونة لن يكون قادراً على الحياة. وعلى ما يبدو، قد يكمن السبب الحقيقي في جزيئات دنا الميتوكوندريات التي تحوي تضاعفات جينية. إن هذه الجزيئات تحوي جميع الجينات الضرورية لإنتاج الطاقة، ولذا فهي لن تكون مسؤولة مباشرة عن نشوء إشكال ما. ولكن لأنها تحوي تضاعفات داخلية، فهي تعاني سيرورات مختلفة (قد يكون من بينها المزاوجة (التشفيع) الداخلية Internal Pairing والتأشيب Recombination)، تقود في النهاية إلى حدوث أخبان مُفْسِدة.

وعيوب الدنا الميتوكوندري الموروثة تُنتج أحياناً أشكالاً مبكرة من اضطرابات تصيب كثرة من الأفراد في أواخر حياتهم، كالداء السكري والصمم وأمراض القلب وضعف العضلات ومشكلات حركية والخَرَف. وعلاوة على ذلك، فقد ثبت أن بعض طفرات دنا الميتوكوندريات مسؤول عن بعض حالات ألزايمر وخلل التوتر Dystonia (اضطراب حركي متفاقم) وأمراض تنكسية عصبية أخرى. إن جميع هذه الأنماط ــ مع حقيقة أن عدداً من الأمراض التنكسية التي تحدث غالباً في سن متأخرة، قد اتضح ارتباطها بهبوط فاعلية المعقدات البروتينية ذات العلاقة بإنتاج الطاقة (كما هي الحال تماماً في معظم أمراض دنا الميتوكوندريات) ــ تشير إلى أن التناقص المطرد في إنتاج طاقة الميتوكوندريات (المركّب ATP) سواء في الأعصاب أو العضلات أو في نسج أخرى، يسهم إسهاماً أساسياً في الشيخوخة وفي نشوء الأمراض التنكسية المختلفة المرتبطة بها.

الشيخوخة والأمراض المرتبطة بتقدُّم العمر

ومع تقدم العمر، تتسبب عدة عوامل في هبوط إنتاج الطاقة في الميتوكوندريات، حتى لدى الأفراد الذين يبدؤون حياتهم بجينات ميتوكوندرية ونووية صحيحة. ويُعدُّ التعرّض الطويل الأمد لذيفانات (توكسينات) بيئية معينة واحداً من هذه العوامل. ويرجع فعل أشد الذيفانات سمية إلى تثبيطها الميتوكوندريات. وقد يتمثل العامل الثاني في تراكم الطفرات الجسدية في دنا الميتوكوندريات، والذي يستمر طوال الحياة.

وتقول النظرية الميتوكوندرية للشيخوخة بأننا مادمنا نحيا وننتج المركب ATP، فإن ميتوكوندرياتنا تولّد جذور أكسجين حرة، تهاجم ميتوكوندرياتنا بقوة وتطفّر جزيئات الدنا فيها. والفرد الذي يبدأ حياته بجينات ميتوكوندرية صحيحة، سيؤدي التراكم العشوائي للطفرات الجسدية في دنا ميتوكوندرياته في النهاية، إلى خفض نتاجه الطاقي دون المستوى المطلوب في نسيج واحد أو أكثر، وذلك إذا امتد به العمر فترة كافية. وعلى هذا النحو، تسهم الطفرات الجسدية والتثبيط الميتوكوندري في حدوث العلامات العامة العادية المميِّزة للشيخوخة، كفقدان الذاكرة والسمع والرؤية ونقص القدرة على الاحتمال.

ولوحظ لدى الأفراد الذين انخفض فعلاً نتاجهم الطاقي (نتيجة طفرات ميتوكوندرية أو نووية، موروثة أو بتأثير الذيفانات Toxins أو عوامل أخرى)، أن الإصابة الناجمة عن الطفرات الجسدية لجزيئات دنا الميتوكوندريات ستخفض إنتاج الطاقة دون المستوى المطلوب بسرعة أكبر. إن هؤلاء الأفراد سيُظهرون الأعراض في وقت مبكر، وسيتفاقم المرض لديهم إلى أسوأ حال له على نحو أسرع مما يحدث لدى الأفراد الذين بدؤوا حياتهم بنتاج طاقي سوي.

ولكن هل هناك دليل على أن إنتاج الطاقة يتناقص، وأن الطفرات الجسدية لجزيئات دنا الميتوكوندريات تتزايد مع تقدم الإنسان بالعمر؟ هذا ما يحدث فعلاً، فلقد أوضحت بحوث كثيرة أن فاعلية مُعقّد Complex واحد على الأقل من معقّدات السلسلة التنفسية تتدنى مع العمر في الدماغ والعضلات الهيكلية Skeletal والقلب

والكبد. وعلاوة على ذلك، وُجد أن طفرات مختلفة ـ تنتج من إعادة ترتيب جينات دنا الميتوكوندريات ـ تتزايد مع العمر في نسج كثيرة، ولا سيما في الدماغ (وعلى أوضح ما يكون في النواحي المسيطرة على الذاكرة والحركة). كما تبين أن طفرات إعادة الترتيب تتراكم مع تقدم العمر طفرات معينة ناتجة من استبدال القواعد وذات علاقة بأمراض موروثة في دنا الميتوكوندريات.

وتتفق هذه التقارير كلها على أن تأثير طفرات معينة يصبح في حدود يمكن كشفها قبل سن الثلاثين أو الأربعين، وأن هذا التأثير يتزايد أُسّيًا بعد ذلك. والدراسات التي أجريت على نُسج عضلية هرمة، تُعْزي بعض هذا التزايد إلى تضخيم انتقائي لجزيئات من دنا الميتوكوندريات خُبِنَتْ منها قطعة معينة.

بيانات داعمة

إن الدراسات التي أجريت على نسج أُخِذت من أفراد أصيبوا في أواخر حياتهم بأمراض عصبية وعضلية تنكسية مزمنة، تقدّم دعماً لفرضية أن بعض هذه الحالات لها علاقة بتراكم طفرات جسدية. فمثلاً، يفقد المصابون بداء هنتنگتن Huntington السيطرة الحركية ويصابون بالخرف في أواخر حياتهم نتيجة إرثهم طفرةً نوعية في دنا النّوى. بيد أنهم يُظْهِرون أيضاً مستوى من خبن دنا الميتوكوندريات في أدمغتهم يفوق أقرانهم الأصحاء الذين لهم العمر نفسه؛ وهذه علامة تدل على ارتفاع معدل الطفرات الجسدية في الميتوكوندريات. وتتضافر الطفرة النووية Nuclear والطفرات الجسدية الميتوكوندرية على خفض إنتاج الطاقة في خلايا الدماغ، فتظهر الأعراض في سن البلوغ.

وكما نوّهتُ سابقاً، فقد عُزِيَ أيضاً قسم من داء ألزايمر إلى طفرات خلْقية في دنا الميتوكوندريات. بيد أن إخفاق هذه الطفرات في إحداث أعراض مباشرة يعني أنها قد تكون غير كافية في حد ذاتها لتسبّب الداء. ودعم الطفرات الميتوكوندرية المكتسبة لآثار الطفرات الموروثة قد يكون حلقة مفقودة أخرى، بالفعل، غالباً ما تبدي النُسُج الدماغية لمرضى ألزايمر مستويات عالية استثنائياً من التغيرات الجسدية في دنا ميتوكوندرياتها.

ويتمثل أحد الاحتمالات المثيرة للاهتمام في أن جزءاً كبيراً من النمط الثاني (الذي يظهر عند البلوغ) للداء السكري ـ الذي يُبتلى به ملايين الأمريكيين بعد سن الأربعين ـ قد يرجع أصلاً إلى عيوب موروثة في دنا الميتوكوندريات لم تكتشف بعد. ومع أن مرضى هذا النمط من الداء السكري يفرزون الإنسولين في الدم، إلا أن ما يفرز لا يفي بحاجة الجسم. ويعرف عن الداء السكري أنه يصيب أجيال العائلة الواحدة، وكثيراً ما تكون الأم هي المصابة (كما هو متوقع من توريث دنا الميتوكوندريات). وعلاوة على ذلك، فإن البحوث قد أثبتت فعلاً أن إعادة ترتيب دنا الميتوكوندريات وطفرات استبدال القواعد، تحدث في مراحل معينة من النمط الثاني للداء السكري. ومن المنطقي الافتراض بأن طفرات أخرى تُحْدِث التأثير نفسه. وقد تتمثل إحدى الآليات الأخرى المسبّبة للداء السكري، والأقرب إلى الواقع، في أن طفرات دنا الميتوكوندريات تحرم الخلايا المنتجة للإنسولين من الطاقة التي تحتاج إليها كي تفرز هذا الهرمون على نحو ملائم، وذلك عن طريق إنقاص المركب ATP.

وهناك اقتراح آخر مهم يتلخص في أن القصور القلبي لدى بعض مرضى التصلب العصيدي Atherosclerosis يتسارع بنشوء طفرات جسدية في دنا الميتوكوندريات. وعندما تنقبض الشرايين التي انسدّت جزئياً بلويحة التصلب العصيدي، فإنها تنغلق مؤقتاً معوّقة جريان الدم إلى القلب، وبالتالي وصول الأكسجين إلى العضلة القلبية، وهي حالة تعرف بالإقفار Ishemia. وبغياب الأكسجين تتوقف السلسلة التنفسية عن العمل، لتقوم عند استئناف ورود الدم والأكسجين (أو ما يعرف بإعادة التروية Reperfusion)، بإطلاق فيض من جذور الأكسجين الحرة. وبطبيعة الحال، تخرب هذه الجذور دنا الميتوكوندريات في العضلة القلبية، وتنقص كمية المركب ATP الضرورية للانقباض. ومع الأخذ بمنطلق هذه الأحداث، فإن قلوب المرضى التي توسّعت بالإقفار المزمن وإعادة التروية تبدي معدلاً عالياً من إيذاء دنا الميتوكوندريات.

وأكدت الدراسات التي أجريت على القوارض، الشك بأن التراكم المتسارع لطفرات دنا الميتوكوندريات يُعجّل بالشيخوخة. فالحيوانات التي نشأت على غذاء مُقيَّد (محدد) تظل معافاة، وتحيا مدة أطول من أقرانها التي تتغذى بشكل حرّ *[انظر: «تقييد السعرات (الكالوريات) وعلاقته بالشيخوخة»، العلوم، العدد (1996) 4، ص 18]*. فالحيوانات المقيّدة الغذاء والأطول آجالاً والتي تُنتج مستويات أقل من جذور الأكسجين الحرة، تُراكِم في دنا ميتوكوندرياتها أذيات أقل مما تراكمه مثيلاتها من الجراء المطلقة الحرية في تناول غذاء وافر.

ما الذي ينبغي علينا فعله؟

إذا كانت أذيّة الجذور الحرة تسبّب فعلاً تراكم الطفرات الجسدية في دنا الميتوكوندريات مسرعةً بذلك حدوث الشيخوخة، فإن المعالجات التي تعوق إنتاج الميتوكوندريات لهذه الجذور (وتحمي بالتالي دنا الميتوكوندريات)، قد تبطئ الشيخوخة وتؤجّل ظهور الأمراض المرتبطة بها. وقد تشتمل هذه المقاربات Approaches على معالجة تستمر مدى الحياة بمضادات الأكسدة (كتميم الإنزيم Q أو الفيتامين C أو الفيتامين E). ونشير بهذا الخصوص إلى أن الدراسات على الحيوانات تدعو إلى التفاؤل.

وتتمثل استراتيجية أخرى لإبطاء سيرورات الشيخوخة بتقييد تضخيم جزيئات دنا الميتوكوندريات الطافرة في العضلات أو في النسج الأخرى. وللوصول إلى ذلك، يحاول العلماء إيضاح التأثيرات الجزيئية Molecular Interactions التي بوساطتها تكشف النواة العوز الموضعي في الطاقة وتثير تكاثر الميتوكوندريات الشاذة الموجودة في الجوار.

قبل عشر سنوات، كانت قلة من البيولوجيين تتصور أن لطفرات دنا الميتوكوندريات علاقة بعشرات من الأمراض الخفية وبالشيخوخة وبتشكيلة من الأمراض التنكسية المزمنة. ولكن دراسات دنا الميتوكوندريات تُقدّم حالياً مفاتيح جديدة لإيضاح نشوء كثرة من العلل، حتى إنها تقترح مقاربات لمعالجة هذه العلل ولإيقاف تفاقمها. وإذا ما صحت التخمينات حول دور طفرات دنا الميتوكوندريات في إحداث الشيخوخة ونشوء الأمراض، فإنه سيكون للدراسات اللاحقة لبيولوجيا الميتوكوندريات دور كبير في تخفيف معاناة البشر.

المؤلف

Douglas C. Wallace

أستاذ الوراثيات الجزيئية ومدير مركز الطب الجزيئي في كلية طب جامعة إموري. حصل على الدكتوراه في علم الأحياء المجهرية (الميكروبيولوجيا) ووراثيات الإنسان من جامعة ييل. وقد برهن مع زملائه، ولأول مرة، على أن دنا DNA الميتوكوندريات للخلايا البشرية يكوّد لخلال قابلة للتوريث. ومُنح والاس جوائز كثيرة لبحوثه على مجين (جينوم) الميتوكوندريات البشرية، بما في ذلك جائزة (وليام ألان) للعام 1994، التي تقدمها الجمعية الأمريكية لوراثيات الإنسان تقديراً منها للإسهامات المتميزة في هذا المجال.

مراجع للاستزادة

Mitochondrial Genetics: A Paradigm For Aging And Degenerative Diseases? D. C. Wallace in Science, Vol. 256, Pages 628 — 632; May 1, 1992.

Mitochondrial DNA Variation In Human Evolution: 1994 William Allan Award Address. D. C. Wallace in American Journal Of Human Generics, Vol. 57, No. 2, Pages 201 — 223; August 1995.

Mitochondrial Genetics. D. C. Wallce, M. D. Brown and M. T. Lott in Emety and Rimoin's Principles and Practice Of Medical Genetics. Third edition. Edited by David L. Rimoin et al. Churchill Livingstone, 1997.

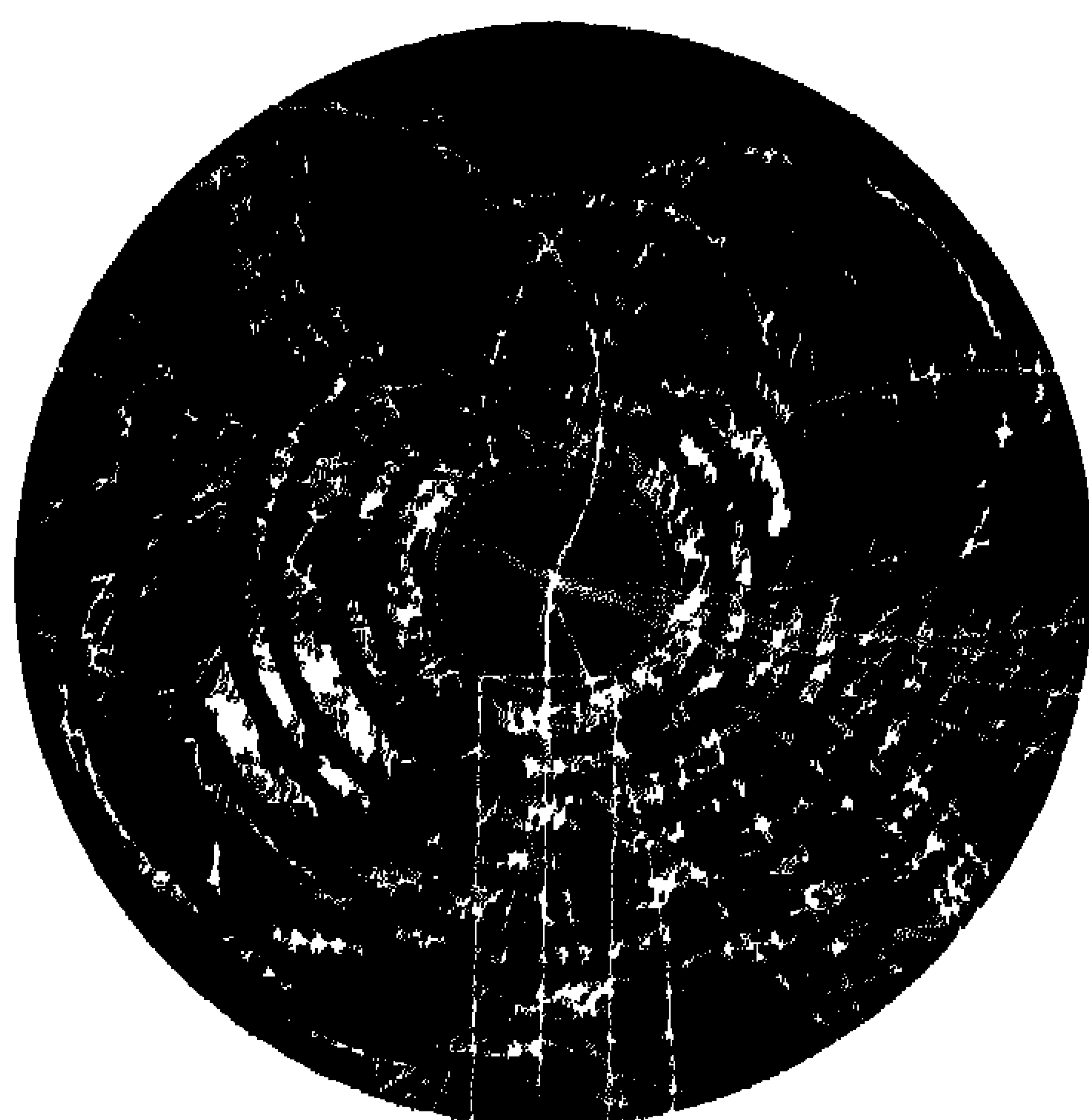
Mitomap: A Human Mitochondrial Genome Database, 1995 — 1997.

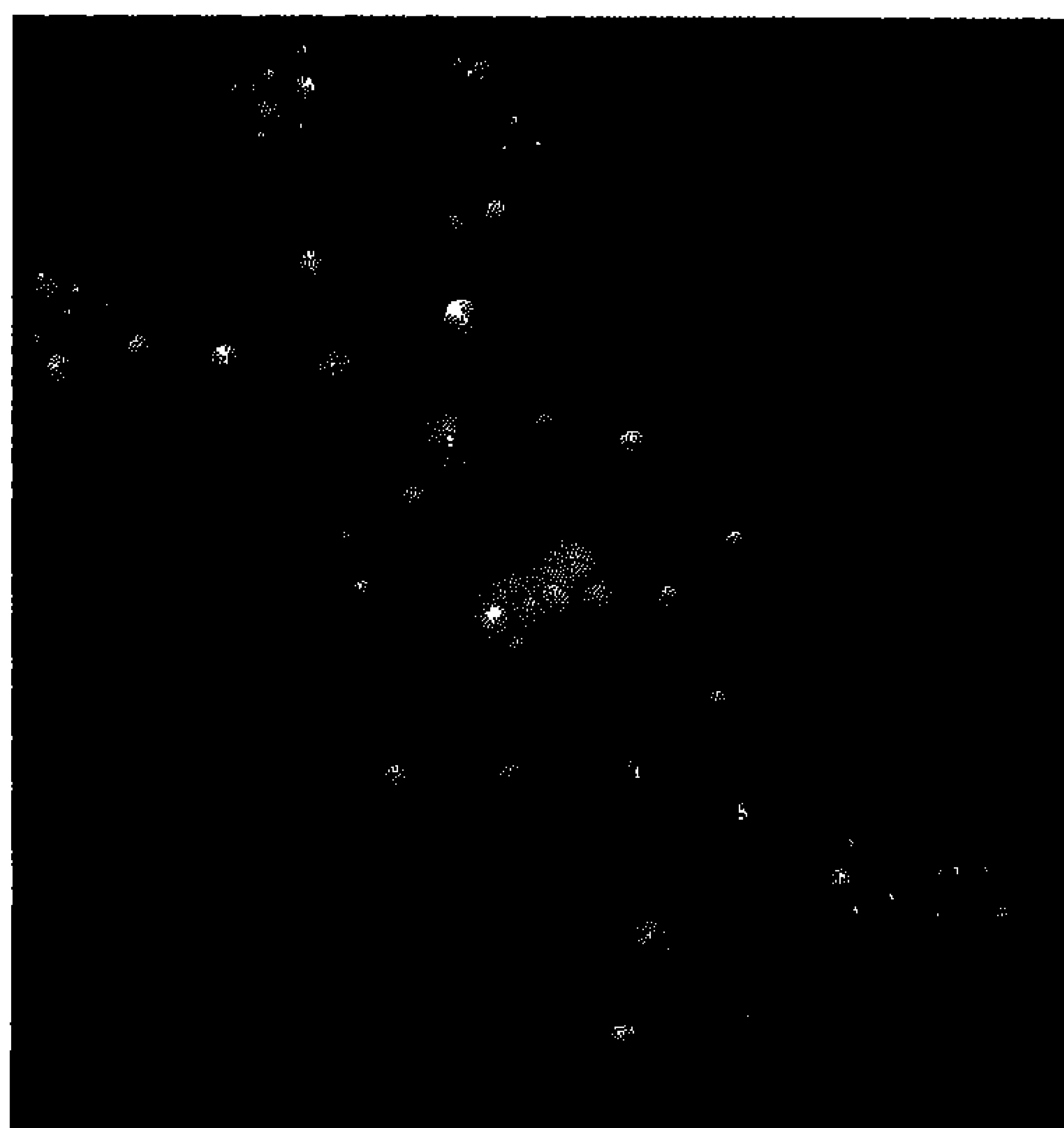
Center For Molecular Medicine, Emory University, Atlanta, Ga. Available on the World Wide Web at http: //www. gen. emory. edu/ mitomap. html.



الباب السادس 6

فيزياء نووية





التهديد الحقيقي لتهريب المواد النووية

على الرغم من أن العديد من الحوادث التي استقطبت وسائل الإعلام بشكل واسع كانت مدبّرة أو مبالغاً فيها فإن مخاطر نجاح عملية واحدة أكبر من أن تُهمل.

(ف. ويليامز). (ب.ن. ويسنر)

اعتبر أغلب الناس في القرون الماضية أن التهريب مهنة مقصورة على فئة قليلة تستخدمها كطريقة لتجنب دفع الضرائب وتوفير البضائع التي لا يمكن الحصول عليها بالطرق المشروعة. وأضافت المخدرات بُعداً مُغرياً للتهريب خلال السبعينيات والثمانينيات، ولكن التجارة باليورانيوم والبلوتونيوم خلال السنوات الخمس الماضية أعطت التهريب صلة جديدة بالأمن العالمي.

مازال الجدل قائماً حول التهديد الذي يحدثه تهريب المواد النووية. ويرفض بعض المحللين اعتباره مؤذياً، فهم يجادلون بأن كميات قليلة فقط من المواد تنتقل من مالك لآخر، وفيما عدا حالات نادرة لا تعتبر معظم هذه الكميات من الصنف المستخدم في الأسلحة. لم يكن بالمستطاع إيجاد صلة بين أي من المواد المشعة المهربة التي تمت مصادرتها من قبل السلطات الغربية مع مخزونات الأسلحة بشكل واضح. لقد كانت بعض كميات البلوتونيوم التي حاول المهربون بيعها مأخوذة من أجهزة كشف الدخان.

إضافة إلى هؤلاء المهربين الهواة، هناك العديد من المخادعين المتسرّعين الذين يبيعون العناصر المستقرة التي جُعلت مشعة إلى حين بتعريضها للإشعاع أو الذين يحصلون على مبالغ كبيرة تُدفع مقدماً مقابل تقديم عينات صغيرة جداً. وبالفعل فإن أغلب هؤلاء الذين يتاجرون بالمواد النووية ليس لديهم معرفة أو فكرة مسبقة بالمواد التي يسرقونها، فأحد أقطاب هذه التجارة مات بالتسمم الإشعاعي بعد أن حمل السيزيوم في جيب قميصه. كما احتفظ أحد القصابين (الجزارين) في سان بترسبورك بمقدار من اليورانيوم في وعاء زجاجي ووضعه في ثلاجته.

الخطر الحقيقي:

بناء على الطبيعة الخطرة لأغلب عمليات تهريب المواد النووية المكتشفة حتى الآن، فإن بعض المصادر المطلعة — في ألمانيا على الأقل — تفترض أن المشترين لهذه المواد هم فقط من الصحفيين ورجال الشرطة السريين أو عملاء أجهزة الاستخبارات. ويذهب البعض إلى أبعد من ذلك إذ يؤكد بأن دولاً مثل العراق وإيران وليبيا وكوريا الشمالية لا يمكن أن تكون مهتمة بالحصول على الأسلحة النووية المحظورة في الوقت الذي تقوم فيه بمحاولات لإعادة العلاقات الطبيعية مع الغرب.

يمثل تهريب المواد النووية تحدياً خطيراً، ففي أغلب الأعمال التجارية المحظورة نشاهد الجزء الظاهر من هذه الأعمال فقط، ولا يوجد ما يدعو لأن تشذ السوق السوداء للمواد النووية عن هذا مبدأ. تصادر الشرطة أكثر من 40% من المخدرات التي تدخل إلى الولايات المتحدة وربما يتم مصادرة نسبة أقل من ذلك من الكميات

استخدام بعض المواد النووية

اسم المادة	استخدام مشروع	استخدام محظور
إمريشيوم 241	تستخدم جسيمات ألفا الصادرة عنه في مكاشيف (مكشافات) الدخان وأجهزة أخرى	الخداع (بديل من مواد أكثر غلاءً)
بيريليوم	عواكس نيوترونية في المفاعلات والقنابل	المفاعلات المحظورة؛ الأسلحة النووية
سيزيوم 137	مصدر مشع للتطبيقات الصناعية والطبية؛ يوجد في النفايات المشعة من المفاعلات	الخداع؛ الاغتيال بالإشعاع
كوبالت 60	مصدر لأشعة غاما للتطبيقات الصناعية أو الطبية	الخداع؛ الاغتيال بالإشعاع
ليثيوم 6	القنبلة الهيدروجينية	القنبلة الهيدروجينية
بلوتونيوم 210	مصدر جسيمات ألفا في مكاشيف الدخان؛ الأسلحة النووية؛ وقود المفاعلات النووية	الخداع؛ الأسلحة النووية
بولونيوم 210	مصدر لجسيمات ألفا والنيوترونات في التطبيقات الصناعية	الأسلحة النووية
يورانيوم	وقود للمفاعلات النووية؛ الأسلحة النووية	الخداع؛ الأسلحة النووية
زركونيوم	مادة بنائية في المفاعلات النووية	المفاعلات المحظورة

التي تدخل أوروبا الغربية. وبلا شك فإن المعروض من المواد النووية أقل من المخدرات، ولكن خبرة سلطات فَرْض القوانين في إيقاف شحنات اليورانيوم أقل من الخبرة المتوافرة لمصادرة الماريجوانا أو الحشيش. لذا فإنه من الغباء التصديق بأن السلطات توقف أكثر من 80% من هذه البضائع.

يضاف إلى ذلك، أن أي معدل تسرب لهذه المادة مهما كان صغيراً له عواقب كبيرة. فمع أنه من الصعب ـــ بسبب قواعد السرية في استخدام المواد النووية ـــ الحصول على أرقام دقيقة، فقد قدّر (ث. كوشران) (من لجنة الدفاع عن المصادر الطبيعية في واشنطن العاصمة) أن القنبلة الذرية تحتاج إلى ما بين 3 و25 كيلوغرام من اليورانيوم المخصّب أو ما بين كيلوغرام واحد و8 كيلوغرام من البلوتونيوم. ويشغل الكيلوغرام من البلوتونيوم حجماً لا يزيد على 50.4 سنتيمتر مكعب أو فقط سُبع حجم علبة الألمنيوم التي تستخدم في المشروبات الغازية.

مع أنه يمكن بالمراقبة الصارمة لكل السلع المشحونة بالسفن العالمية ضبط بعض المواد المشعة، فإن العديد من النظائر الخطرة مثل اليورانيوم 235 والبلوتونيوم 239 تصدر إشعاعاً ضعيفاً مما يصعّب كشفها بعدادات كايكر أو الأجهزة المشابهة لها. تستطيع أجهزة الأشعة السينية والتنائر النيوتروني الموجودة في المطارات للكشف عن المتفجرات الكيميائية اكتشاف النظائر المشعة الخطرة أيضاً، ولكن كفاءتها عملياً محدودة في هذا المجال لأنها غير مُصمَّمة لهذا الهدف.

إذا كانت كمية المواد اللازمة لصنع سلاح نووي صغيرة بقيمتها المطلقة، فإنها صغيرة جداً مقارنة بالمخزون الهائل لليورانيوم المخصب، وبخاصة في روسيا، حيث لا يزال يعاني كل من مراقبة المخزون وحمايته بعض الصعوبات. ويمكن للمخزون العالمي من البلوتونيوم الذي وصل في عام 1992 إلى 1100 طن وسيصل في عام 2000 إلى 1600 أو 1700 طن، أن يصنّع 200000 قنبلة نووية، تعادل القدرة التفجيرية لكل منها 10 كيلوطن من المتفجرات التقليدية وحتى خلال الفترة التي ستنفَّذ ضمنها اتفاقيات نزع الأسلحة النووية فإن مخزون البلوتونيوم النقي الممكن استخدامه في الأسلحة سيزداد في الولايات المتحدة وروسيا بمقدار 100 طن، ومن السخرية أن يكون أكثر الأمكنة أماناً لخزن البلوتونيوم بعد مرحلة الحرب الباردة هو رؤوس الصواريخ الحاملة له.

حماية غير صارمة:

ويضاف إلى ذلك أن كلاً من الولايات المتحدة والاتحاد السوفييتي السابق يمتلك نحو 650 طناً من اليورانيوم عالي الخصوبة. وتسبب هذه المخزونات الكبيرة القلق لأن التحكم فيها ضعيف وغير كامل. كما تعاني المستودعات الروسية بشكل خاص الحماية غير المتقنة والإدارة الضعيفة والإجراءات غير الدقيقة. ولا يزال تحديد كمية البلوتونيوم المنتجة يتم باستخدام أجهزة بدائية دون توافر خط أساس واضح للقياسات، لذا فإنه من المستحيل معرفة ما يُفقد منه.

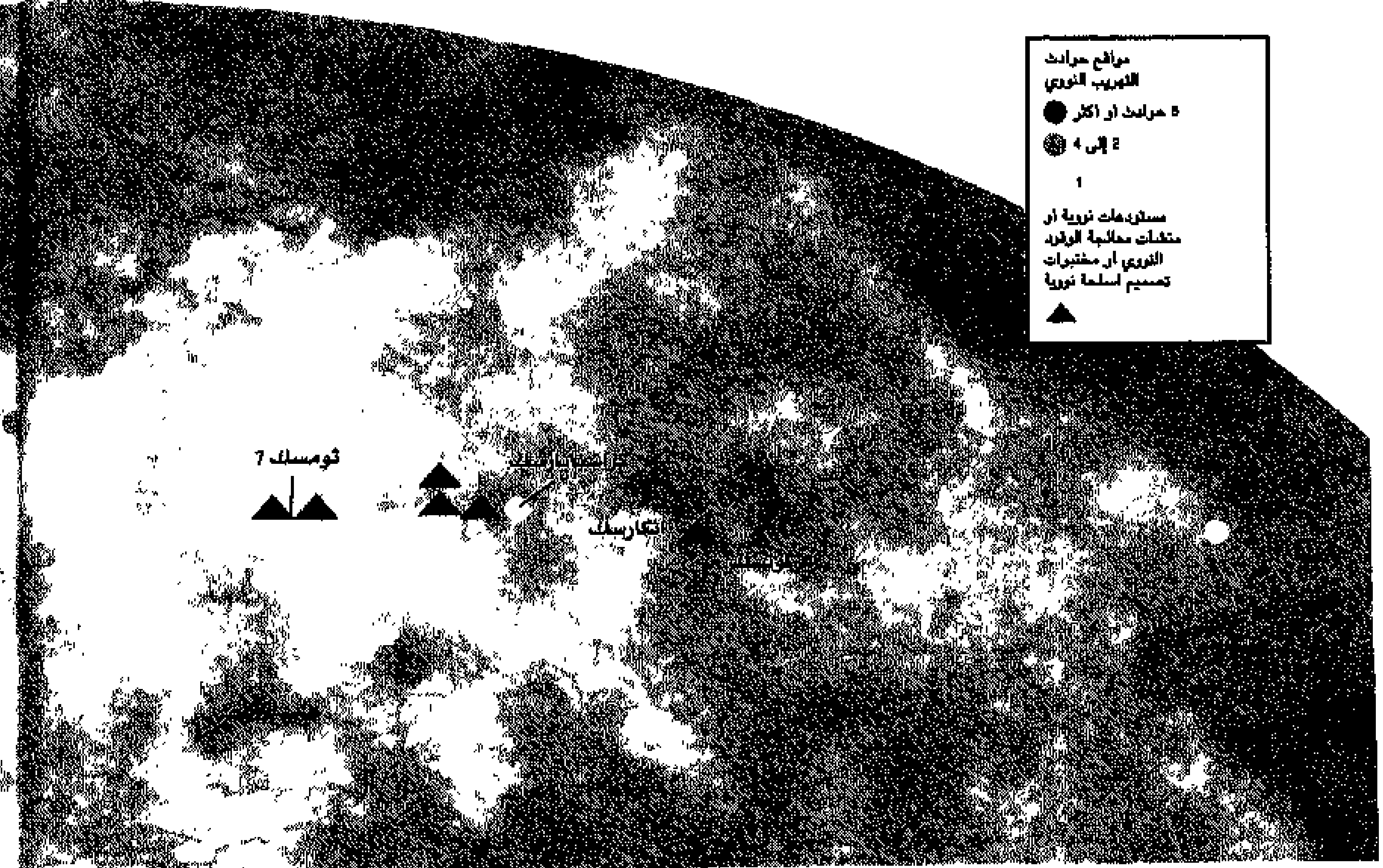
إن غياب الحماية الأمنية في المنشآت النووية يزيد المشكلة تعقيداً. فقد أدى انهيار جهاز الاستخبارات السوفييتية (KGB) إلى إضعاف العديد من أنظمة المراقبة النووية. ومن المفارقات أنه على الرغم من أن إجراءات الأمن في النظام السوفييتي السابق كانت شديدة فإنها في الغالب غير ضرورية. فالعاملون في المجال النووي كانوا مؤيدين للنظام ويتقاضون أجوراً مجزية ويتمتعون بمزايا عالية. ولكن مع تدهور الأجور والظروف أصبح الاستياء واسع الانتشار، وأدى وجود العمال المستائين من الأجور المنخفضة والتأخير في دفعها لأن تصبح دوافع سرقة المواد النووية أكبر بكثير من تدهور القيود والضوابط.

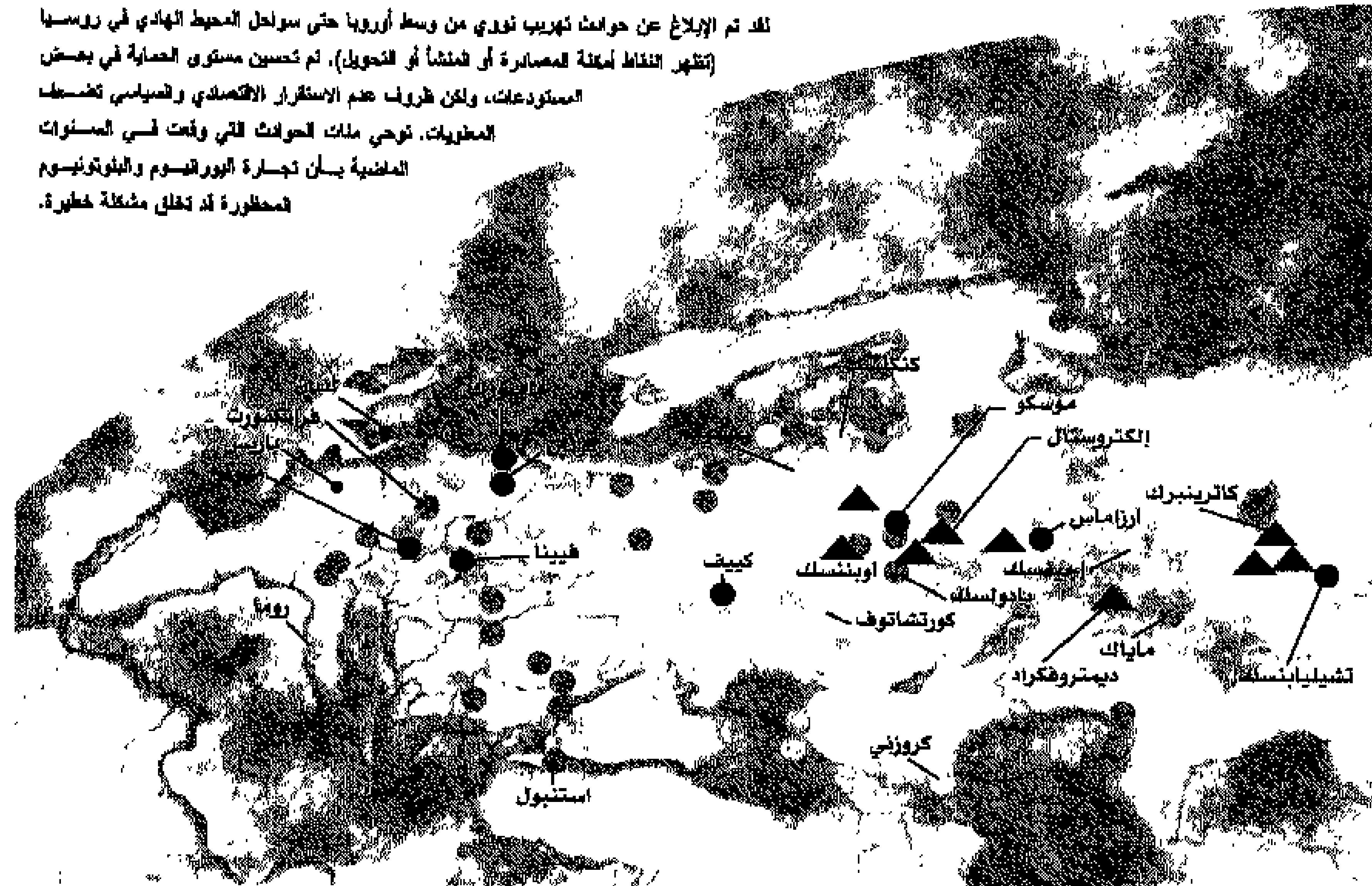
ففي الشهر 1993/11 تسلل لص عبر فتحة في السور ودخل منطقة من المفترض أنها آمنة ومحمية في مركز بناء السفن في سيفموريت بالقرب من ميرمانسك. وقد استخدم منشاراً لقطع قفل باب قسم التخزين الذي يحوي وقوداً للغواصات النووية وسرق أجزاء من ثلاث مجموعات وقود يحوي كل منها 4.5 كيلوغرام من اليورانيوم المخصب. وبالرغم من أن اليورانيوم المسروق استُردّ فيما بعد فإن (م. كوليك) الموظف الذي حقق في السرقة كان قاسياً جداً في تقريره، إذ ذكر فيه: «لا تتوافر أنظمة لأجهزة الإنذار ولا تـوجد إضاءة وكان عدد الحراس قليلاً». وكتب كوليك: «على الأرجح فإن البطاطا تحظى في هذه الأيام بحراسة أفضل من المواد المشعة». إن الحماية في هذا المركز ومنذ تاريخ الحادثة لم تتحسن كثيراً.

إن الوضع لا يدعو للتشاؤم الكامل، فالتقارير تدل على أن بعض المواقع النووية ـــ التي كانت سابقاً مواقع سرية تُصمم وتُصنع فيها القنابل النووية ـــ فيها تدابير أمنية جيدة. والحراسة على المواد المستخدمة في صناعة الأسلحة أشد صرامة من تلك التي على المواد التي لا تُستخدم في هذه الصناعة. وعلى الرغم من أن عدد محاولات دخول المنطقة المحظورة في أرزماس -16 (مختبر تصميم الأسلحة الروسي والذي يعادل تقريباً مختبر لوس ألاموس في الولايات المتحدة) قد تضاعف خلال العام 1995، فيبدو أن النظام الأمني كان فعالاً. كما أن موسكو تحاول أيضاً إعادة تأسيس نظام أمني في كل مكان من صناعتها النووية، ففي بعض الحالات مثل معهد كورتشاتوف للطاقة النووية في موسكو يتم الأمر بمساعدة مباشرة من الولايات المتحدة. إن المهمة هائلة حتى الآن، فمازال هناك نحو 1000 مستودع لليورانيوم المخصب والبلوتونيوم متناثرة في مختلف أنحاء الاتحاد السوفييتي السابق.

بروز شبكات التهريب:

وفي ضوء هذه المعطيات ليس من المستغرب ازدياد حوادث تهريب المواد النووية ـــ الفعلي منها والمزيف ـــ خلال السنوات القليلة الماضية. فالسلطات الألمانية مثلاً سجلت 41 حادثة في عام 1991 و 158 حادثة في عام 1992 و241 حادثة في عام 1993 و267





لقد تم الإبلاغ عن حوادث تهريب نووي من وسط أوروبا حتى سواحل المحيط الهادي في روسيا (تظهر النقاط أمكنة المصادرة أو المنشأ أو التحويل). تم تحسين مستوى الحماية في بعض المستودعات، ولكن ظروف عدم الاستقرار الاقتصادي والسياسي تضعف المعنويات. توحي مئات الحوادث التي وقعت في السنوات الماضية بأن تجارة اليورانيوم والبلوتونيوم المحظورة قد تخلق مشكلة خطيرة.

حادثة في عام 1994. وعلى الرغم من أن معظم هذه الحالات لا تشمل تهريب مواد مناسبة لصناعة القنابل، فإنه مع ازدياد عدد الحوادث يزداد احتمال أن يشتمل بعضها على سبائك من الصنف المستخدم في صناعة الأسلحة النووية.

لقد دخل إلى تركيا في الشهر 1993/3، حسب تقرير من استنبول، 6 كيلوغرام من اليورانيوم المخصَّب عبر نقطة حدود أراليك في ولاية قارس. ويبدو أن المواد تم نقلها من طشقند إلى كروزني، حيث كان لمجموعة «مافيا» شيشانية دور في العملية، ثم انتقلت إلى ناختشيفان عبر جورجيا، قبل أن تصل إلى استنبول. وعلى الرغم من عدم توافر ما يثبت الحادث أو درجة إخصاب اليورانيوم، فإنه أثار تخوفاً من أن تكون مجموعات من المافيا الشيشانية قد حصلت على وسيلة للوصول إلى اليورانيوم المخصب في كازاخستان. وتوحي اتفاقية كازاخستان لعام 1994 الخاصة بنقل اليورانيوم المخصب من كازاخستان إلى الولايات المتحدة بتوافر بعض الأسس لمثل هذا التخمين.

وفي الشهر 1993/10 صادرت الشرطة في استنبول 2.5 كيلوغرام من اليورانيوم 238 وسُجن أربعة رجال أعمال أتراك، وكذلك أربعة آخرون يُشتبه بأنهم عملاء للمخابرات الإيرانية. وذكرت مجلة ألمانية في وقت لاحق أن هذا اليورانيوم دخل إلى تركيا عبر ألمانيا. وحسب قول أحد المحتجزين الأتراك (أستاذ جامعي كانت له علاقة سابقة بتهريب الآثار)، فإن الشركاء نقلوا اليورانيوم عبر سيسنا إلى استنبول من هارتنهولم، وهو مطار خاص قرب هامبورك يمتلكه تجار أسلحة إيرانيون.

من الملاحظ أن عام 1994 شهد عدة حوادث ترتبط بتهريب مواد من الصنف المستخدم في الأسلحة النووية أو قريب منه، ففي 1994/5/10 وجدت الشرطة، وهي تفتش منزل رجل الأعمال (أ. جيكل) في مدينة تنكن الألمانية بحثاً عن سلع مهربة، ستة غرامات من البلوتونيوم 239. وكان البلوتونيوم في صندوق بالمرآب، وعُثِر عليه عن طريق الصدفة. كان لجيكل علاقات واسعة، بما في ذلك ارتباطات مع ضباط سابقين في جهاز الاستخبارات السوفييتية (KGB) والشرطة السرية لألمانية الشرقية سابقاً وشركة أسلحة بلغارية تدعى Kintex، والتي كان يُشك منذ زمن طويل بأن لها نشاطات مشينة واسعة. تم نفي معظم الشكوك الأولية، ولكن الأسئلة المهمة بشأن قضية جيكل مازالت دون إجابة. وليس من الحكمة استبعاد احتمال أن يكون هذا البلوتونيوم ببساطة عينة من صفقة كبيرة.

اعتقلت السلطات الألمانية في ميونخ في 1994/8/10 طبيب أسنان كولومبيا وإسبانيين بتهمة حيازة 363.4 غرام من البلوتونيوم عالي النقاوة و 201 غرام من الليثيوم6 (أحد مكونات القنبلة الهيدروجينية). لقد أحضروا بضاعتهم المهربة إلى ميونخ من موسكو على متن طائرة لوفتهانزا وقُبض عليهم وسط الازدحام الشـديد . لقد وُجد بعد



يحمل (ث. كوشران) بسهولة كتلة من اليورانيوم المستهلك تزن 7 كيلوغرام تقريباً. إن كوشران، الفيزيائي العامل في مجلس الدفاع عن المصادر الطبيعية في واشنطن العاصمة، يقدر أن هذه الكمية نفسها من المادة النقية من المرتبة المستخدمة في الأسلحة تكفي لصنع قنبلة قادرة على تدمير مدينة صغيرة.

ذلك أن عملاء ألمانيين من مكتب الاستخبارات الاتحادي الألماني (BND) حرضوا الرجال الثلاثة لإحضار هذه المواد.

لقد تمخض عن هذه العملية جدل كبير في ألمانيا، فلقد اتُّهم عملاء مكتب الاستخبارات الألماني الاتحادي (BND) بالمساعدة على خلق مشكلات التهريب النووي بدلاً من السيطرة عليها. لم تكن للرجال الثلاثة أي علاقة مع عصابات المخدرات الكولومبية أو إرهابيي إقليم الباسك، كما لم تتوافر أدلة على أنهم مهربون محترفون، وكانوا ببساطة يعانون مشكلات مادية حاولوا حلها ببيع الليثيوم والبلوتونيوم.

من ناحية أخرى ومن خلال الجدل حول لياقة تصرفات الاستخبارات الألمانية BND، ضاعت نقطة مهمة، هي أنه على الرغم من أن المتهمين الثلاثة هواة فقد نجحوا في الحصول على كمية ذات قيمة من البلوتونيوم عالي النقاوة.

بعد ذلك وفي 1994/12/14 اعتقلت الشرطة في براك ثلاثة رجال في سيارة تحمل 2.7 كيلوغرام من اليورانيوم 235 عالي الخصوبة (87.7%)، اثنان منهم يعملان في الصناعة النووية قدِما إلى جمهورية التشيك في عام 1994: أحدهما روسي من مدينة قرب أوبننسك والآخر بيلوروسي من منسك. أما الشخص الثالث فهو فيزيائي نووي تشيكي يدعى (ج. فاكلر) ــ كان لا يعمل فعلياً في الصناعة النووية منذ عدة سنوات، وفي منتصف 1994 ظهرت عينة من اليورانيوم المخصب في لاندشت ببافاريا، وفي 1995/3/22 تم اعتقال رجلين، أحدهما ضابط شرطة، لهما علاقة بالحادث الذي وقع في الشهر 1994/12.

القنابل والمافيا

على الرغم من أن بعض البلدان الثورية تشكل السوق الأكبر للأسلحة النووية، فثمة خطر كبير في انضمام مجموعات الجريمة المنظمة أو الإرهابية إلى النادي النووي.

إن التحول من نقل المواد النووية المهربة إلى استخدامها مباشرة أمر سهل: فلقد استخدمت النظائر المشعة في الاغتيالات – زعمت المافيا الروسية أنها زرعت في نهاية عام 1993 حبوباً تصدر إشعاعات غاما في مكتب رجل أعمال في موسكو كانت كافية لقتله خلال أشهر. لقد سجلت حوادث عدة من هذا النوع.



وقد تستطيع عصابات الإجرام استخدام النظائر المشعة في عمليات ابتزاز كبيرة من الحكومات أو الشركات. ومن السهل نسبياً على المبتز إثبات مصداقيته بترك عينة للتحليـل . وتأتي بعد ذلك التهديـدات اللاحقة بتلويث مصادر الهواء أو الماء أو حتى بتفجير سلاح نووي صغير ذي مفعول كبير. ولا يمكن أن يُنفـى بشكل كامل احتمال حصول بعض المنظمات الإرهابيـة أو المتدينين المتطرفين، كالذين وضعوا غاز الأعصاب في قطار الأنفاق بطوكيو عام 1995، على مواد نووية.

وحتى في حال عدم تمكن هذه المجموعة من الحصول على كمية كافية من اليورانيوم أو البلوتونيوم لصنع سلاح انشطاري، فإنه باستطاعتها أن تكون قادرة على خلط النظائر المشعة مع المتفجرات التقليدية لإحداث تلوث واسع الانتشار. فلو استخدم الإرهابيون الذين وضعوا المتفجرات في مركز التجارة الدولي بنيويورك مواد مشعة مثلاً، لأدى ذلك لقتل الآلاف ولأصبح من المستحيل استثمار منطقة تجارية كبيرة.

لقد تناقص عدد قضايا التهريب في ألمانيا على الأقل، منذ الاعتقالات التي غطاها الإعلام بشكل واسع، ويبدو أن التجار قد ذهبوا إلى مكان آخر. إذ ذهب بعضهم عبر سويسرا والنمسا إلى إيطاليا، وبعضهم الآخر اختار الطريق إلى الجنوب عبر جمهوريات آسيا الوسطى والبحر الأسود. ولقد أشار مفتش الوكالة الدولية للطاقة الذرية السابق (د. كي) إلى أن هذه الطرق ما هي في الحقيقة إلا الاتجاه المعاكس للطرق التي كان يستخدمها عملاء جهاز KGB لتهريب البضائع إلى الاتحاد السوفييتي السابق. إن الرقابة على الحدود في هذه المناطق أضعف بكثير من تلك الموجودة على حدود أوروبا الغربية، كما أن الزبائن المحتملين أكثر قُرباً.

لقد ذكر بعض المعتقلين في ألمانيا وتركيا، بشكل واضح، أن بعض الدول الخارجة عن القانون مثل إيران تبحث في الحقيقة عن مواد نووية عالية الجودة. ويبدو أن بعض هذه الدول قد أقام شبكته الخاصة به. ويتوافر لدى ليبيا والعراق الخبرة في مثل هذه الطرق، إذ شكلت كل منهما مجموعة من الشركات الواجهة للمساعدة على التحويل غير المشروع للمواد الكيميائية الأساسية والأجهزة اللازمة لتطوير الأسلحة الكيميائية.

فضلاً عن ذلك، وكما تشير قضية جيكل، ليس المهربون كلهم هواة مضطربين. فعلى الرغم من عدم وجود مافيا نووية موحدة، فإنه يظهر أن الجواسيس السابقين من دول الكتلة السوفييتية السابقة يحتلون مواقع قيادية في الشبكات المحترفة. ومن الواضح أنه انضم إليهم المقاولون المتورطون في صفقات الأسلحة، الذين تتوسع أعمالهم كسلسلة متصلة من التجارة المباحة تنتقل إلى المشبوهة ثم إلى المحظورة.

ولما كان تهريب المواد النووية عملاً مربحاً فليس من المستغرب أن تقوم به مجموعات الجريمة المنظمة. ويبدو أن بعض العصابات التركية تمارس هذه التجارة مستفيدة من خبرتها في التصدير السري للآثار، وهم يعاملون اليورانيوم كأي بضاعة أخرى.

وفي إيطاليا تم اعتقال القاضي (ر. دولشي)، الذي كان يحقق في التجارة النووية لمشاركته في الجرائم التي كان يتعقبها. وأثارت هذه الفضيحة شكوكاً كبيرة لأن هذا القاضي ركز في تحقيقه على بعض القضايا بقصد تحويل الاهتمام عن قضايا أخرى صفقاتها أكثر خطورة.

ومع ذلك ربما كان السؤال الأكثر إلحاحاً هو ذلك المتعلق بتورط عصابات الجريمة المنظمة في روسيا. فعلى الرغم من أن التجارة النووية لا تعتبر من الأولويات لهذه المجموعات – إذ تتوافر نشاطات أخرى ربحها سريع ومخاطرها أقل – فإن هناك تزايداً في الأدلة على أن بعض مجموعات الجريمة المنظمة الروسية تحول أنشطتها إلى الإتجار بالمواد المشعة.

تباطؤ جهود التنفيذ:

وعلى الرغم من الجهود الجادة التي بذلت لمواجهة المشكلة في منشئها، فإن المجتمع الدولي كان بطيئاً في الاستجابة للمخاطر التي

يُظهرها تهريب المواد النووية. يعمل حالياً في هيئة التنظيم النووي الروسية (GAN) 1200 عامل، ولكن مقدار السلطة التي يمكن أن تمارسها هذه الهيئة على الإدارات النووية المدنية والعسكرية ـ غير مؤكد.

فضلاً عن ذلك، حتى لو كانت هيئة التنظيم النووي الروسية ناجحة في عملها، فإنها تحتاج إلى سنوات عدة لتطوير نظام الضمانات. ولن يظلّ المهربون خلال هذه الفترة دون نشاط. ونتيجة لذلك سيزداد تحسن المعلومات الاستخبارية وفرض القانون في المدة المتبقية من التسعينيات. وللأسف، فإن المنظمات الدولية التي لديها الخبرة في الشؤون النووية لا تتعاون بشكل فعال مع الجهات المسؤولة عن إيقاف التجارة المحظورة. فعلى الرغم من أن مقر كل من الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) ومكتب منع الجريمة وفرع القضاء الجنائي للأمم المتحدة هو في مركز فيينا الدولي، فإن أنظمة تلك الوكالة لا تسمح لها بالاشتراك في عمليات البحث والتقصي، لذا فإن الاتصالات بين الطرفين شبه معدومة.

وفي الوقت نفسه فإن الاستجابات الأولية في واشنطن لمشكلة التهريب توصف بأنها قاصرة وضعيفة التنسيق. فقد أخذ مكتب التحقيقات الاتحادي (FBI) منذ عام 1994 زمام القيادة في هذا الأمر وعمل بتنسيق جيد مع وكالة الدفاع النووي ومكتب التحقيقات العسكرية، لكن الولايات المتحدة لاتزال بعيدة عن سياسة شاملة.

إننا نقترح القيام بأسرع ما يمكن باتخاذ تدابير منهجية تشارك فيها العديد من الدول لمنع سرقة المصادر المشعة والحد من المتاجرة بها وردع مشتريها. ويجب على الولايات المتحدة وألمانيا وروسيا والدول الأخرى المهتمة بالمشكلة النووية إنشاء «فرقة تدخل سريع» لها سلطة التحقيق ولديها التسهيلات المناسبة لمقاومة أعمال الإرهاب والابتزاز وتعمل كفريق إدارة الكوارث.

تبدو هذه الفكرة صعبة التحقيق حالياً، وذلك ـ على الأقل جزئياً ـ بسبب الممانعة المستمرة لإدراك خطورة هذا التهديد. وستقع المأساة عندما يكون على الحكومات قبول الحاجة إلى برنامج كبير ولكن بعد وقوع الكارثة النووية.

المؤلفان

Phil Williams – Paul N. Woessner

يعملان في مركز ريدج وي لدراسات الأمن الدولي في جامعة بتسبورك. يعمل ويليمز، الذي يدير المركز، أستاذاً في كلية الشؤون العامة والدولية. وتركزت أبحاثه في السنوات الثلاث الماضية على منظمات الجريمة متعددة الجنسيات وتجارة المخدرات، وهو أيضاً رئيس تحرير المجلة الجديدة «الجريمة المنظمة عبر الدول» Transnational Organized Crime. أما ويسنر، فيعمل باحثاً مساعداً في مركز ريدج وي، وقد حصل على الماجستير في الشؤون الدولية في عام 1994، كما أنه حاصل على الماجستير في علم الكواكب وإجازة جامعية في الفلك والفيزياء من جامعة ماريلاند.

مراجع للاستزادة

"POTATOES WERE GUARDED BETTER". Oleg Bukharin and William Potter in *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 51, No. 3, Pages 46-50; May-June 1995.

CHRONOLOGY OF NUCLEAR SMUGGLING INCIDENTS: July 1994-June 1995. Paul N. Woessner in *Transnational Organized Crime*, Vol. 1, No. 2, Pages 288-329; Summer 1995.

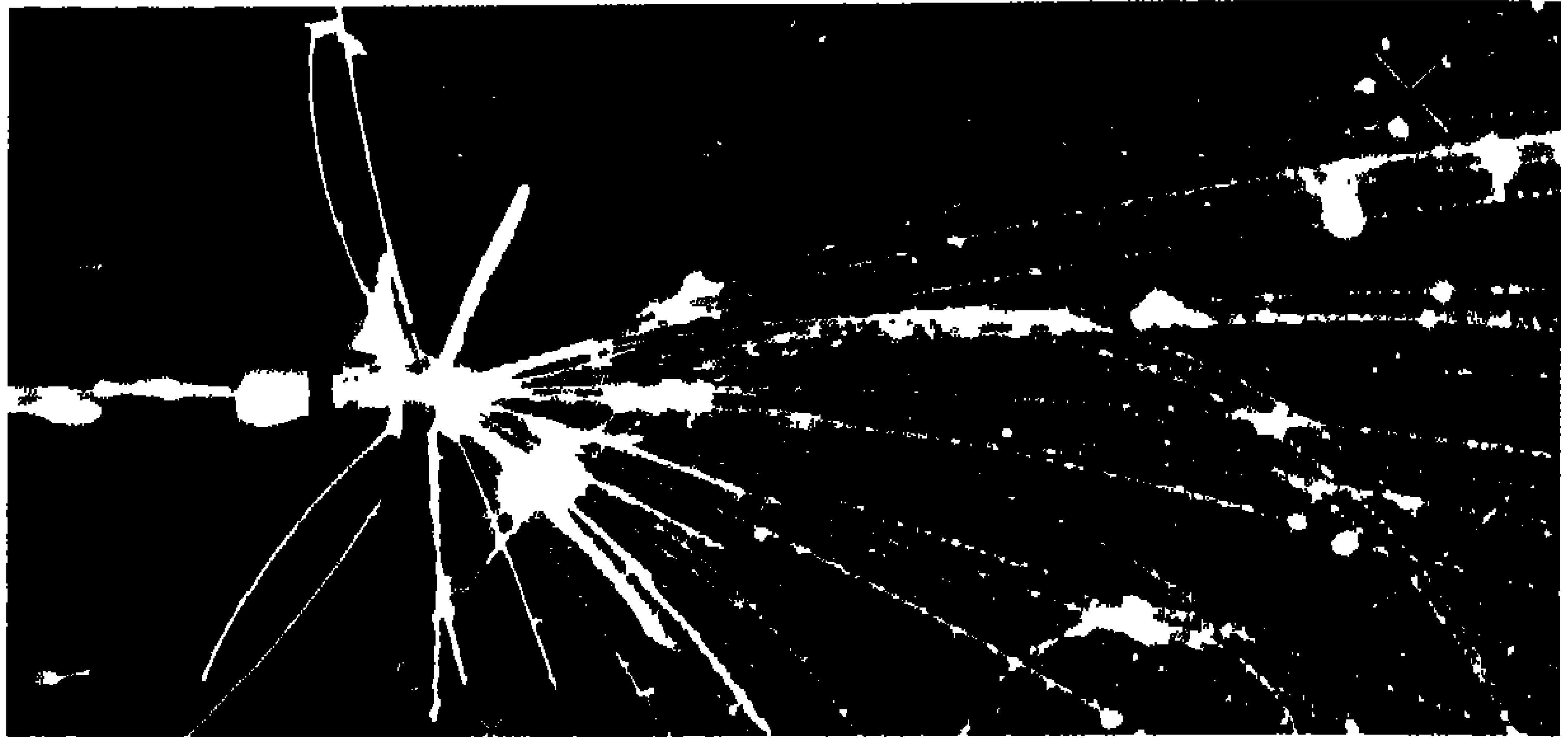
NUCLEAR MATERIAL TRAFFICKING: AN INTERIM ASSESSMENT. Phil Williams and Paul N. Woessner in *Transnational Organized Crime*, Vol. 1, No. 2, Pages 206-238; Summer 1995.

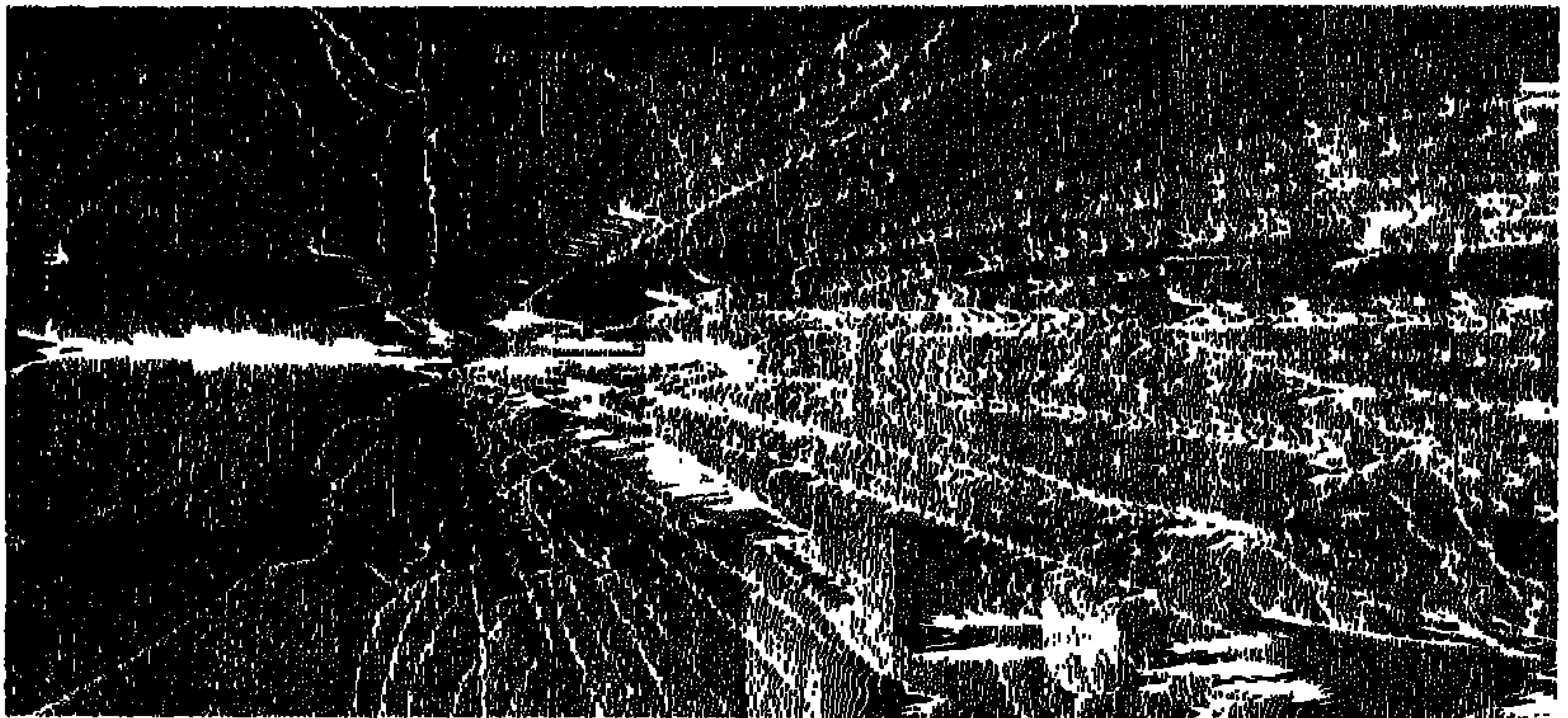


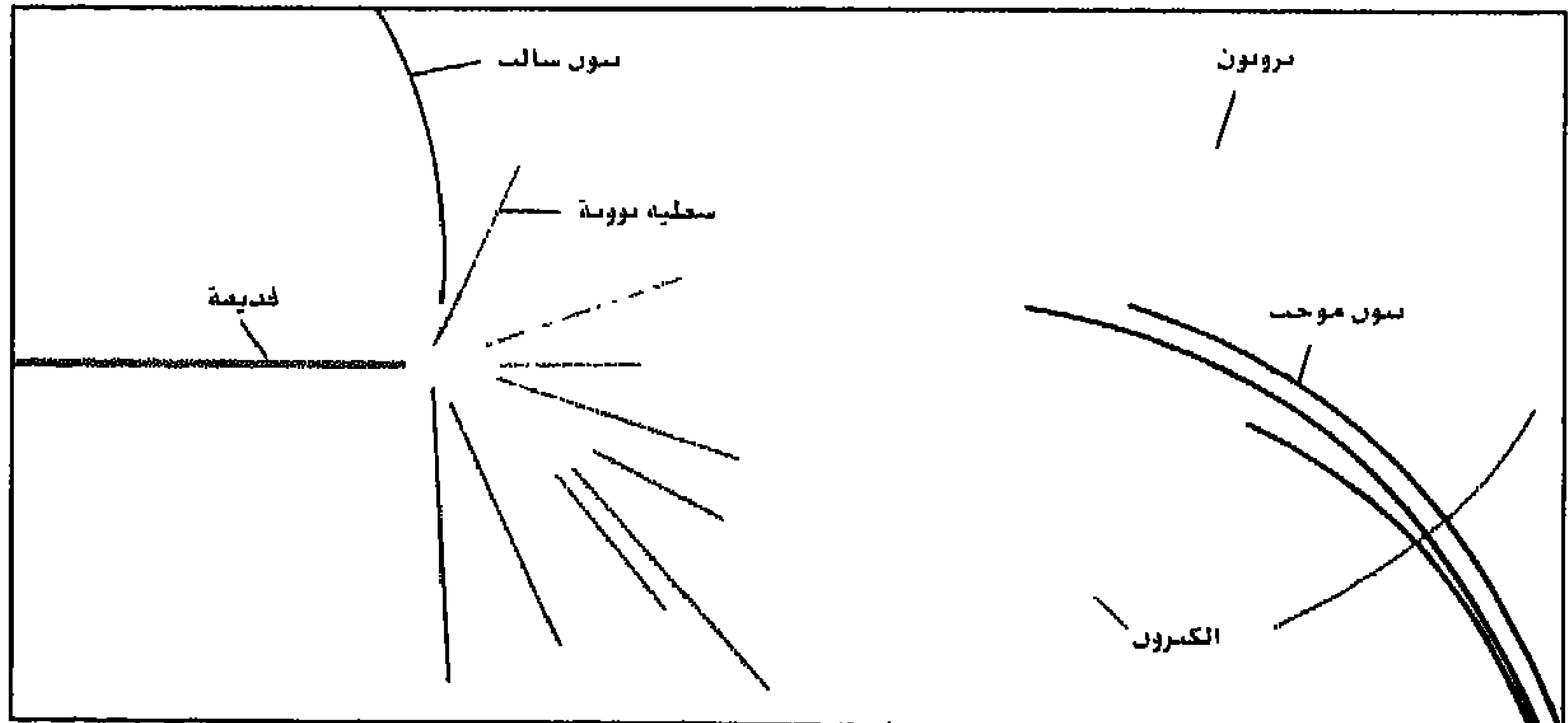
التصادمات العالية الطاقة بين النوى الذرية

تُدفع الآن النوى الثقيلة التي تتحرك بسرعة قدرها 95 بالمئة من سرعة الضوء، إلى الاصطدام بنوى الهدف. ويتضمن الحطام الناتج «أنومالونات» Anomalons وهي شظايا شاذة تكتنفها الأسرار، وتتصادم ثانية بأسرع مما يُتوقع بكثير.

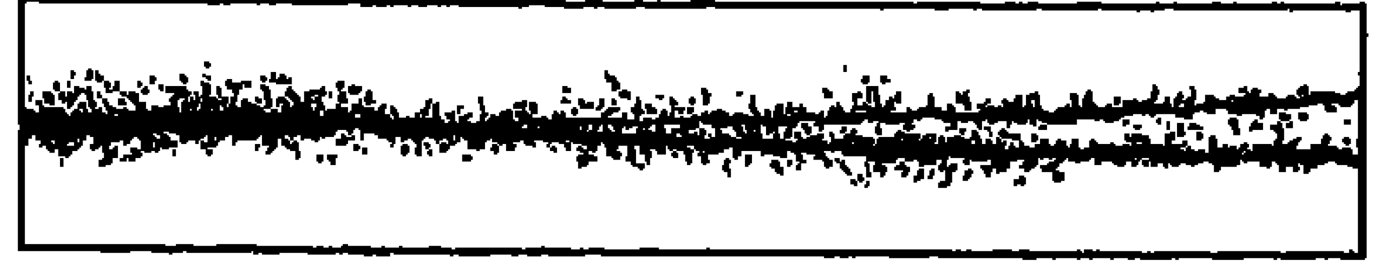
(و.س. ماك هاريس). (ج.و. راسموسن)



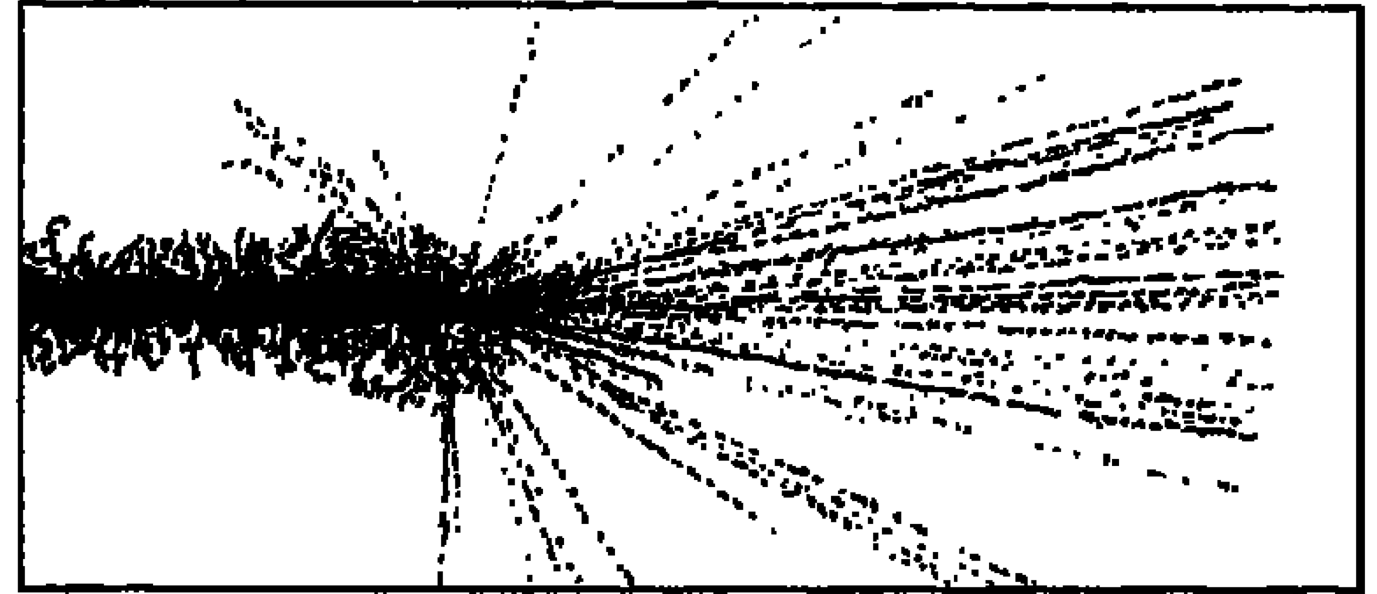




صُوِّر التصادم بين نواتين (في الأعلى) في حجرة الجريان في مختبر لورنس بيركلي التابع لجامعة كاليفورنيا. فعند مرور جسيم مشحون في حجرة كهذه، يخلف وراءه أثراً من الغاز المؤين. وقد قام جهاز مقترن بالشحنة (هو في الحقيقة آلة تصوير تلفازية محكومة بالحاسوب) بإعادة إنشاء التصادم (في الوسط). تشير الذرا إلى شدة الضوء التي تمثل كلاً من كثافة التأين على طول الأثر، وبُعد كل أثر عن آلة التصوير. ويعين المخطط (في الأسفل) هوية بعض الجسيمات. لقد دخلت نواة ذرة الأرغون 40 من اليسار. وكانت طاقتها الحركية 72 بليون (مليار) إلكترون فولط (72 GeV). وبعد أن قطعت نحو 0.3 من المتر في الحجرة صدمت نواة ذرة الرصاص في هدف من أكسيد الرصاص. وكان معظم الحطام الذي يمكن كشفه، والذي انقذف (اندفع) إلى الأمام، مكوناً من البروتونات، التي انحنت مساراتها نحو الأسفل قليلاً بفعل حقل مغنطيسي في الحجرة. وكان بين جسيمات الحطام قليل من البيونات التي أنتجتها طاقة التصادم. وقد قطع بعض البيونات الموجبة مسارات البروتونات. وتحرك بيون سالب إلى الخلف (نحو اليسار). وكانت أثقل الشظايا مكونةً من تجمع من البروتونات والنترونات. وقد خلّفت آثاراً قصيرة شديدة التأين.







ثلاثة أنماط من التصادمات العالية الطاقة بين النوى تم تسجيلها، في بيركلي أيضاً، بوضع المستحلبات الفوتوغرافية في طريق حزمة نووية من اليورانيوم 238 بعد تسريع كل نواة إلى طاقة قدرها MeV 228. وفي تصادم سطحي (في الأعلى) مرت نواة اليورانيوم بالقرب من نواة في المستحلب بحيث تفاعلتا، ولو كهرمغنطيسياً. وقد سبب التفاعل انشطار نواة اليورانيوم إلى شظيتين نوويتين. أما النواة الهدف فبقيت على حالها. (إن الآثار المشوشة المنبعثة من أثري الشظيتين ناشئة عن الإلكترونات المنتزعة من ذرات كثيرة في المستحلب). وفي تصادم هجين وسيط (في الوسط) تصدم نواة اليورانيوم نواة في المستحلب صدمة غير مركزية، فتتفكك النواتان. وإن بعض الآثار الثخينة صنعتها شظايا النواة الهدف التي تبعثرت بزوايا كبيرة، إلى الخلف أحياناً. وفي تصادم مركزي (في الأسفل) انغرزت نواة اليورانيوم في نواة من المستحلب، ثم تفككت الكتلة الناتجة وقذف اندفاعها معظم الشظايا إلى الأمام. إن آثار التصادمات الثلاثة مكبَّرة نحو 400 مرة.

في أول رحلة مؤهولة إلى القمر، في عام 1969، أخبر رواد المركبة (أبولو ــ11) Apollo 11 بظاهرة تلفت النظر بغرابتها: فعندما أغمضوا عيونهم استعداداً للنوم، رأوا وميضاً ضوئياً دقيقاً جداً يحدث أحياناً. وسرعان ما حَدس العلماء على الأرض، أن الومضات سببتها نوىً ذرية ثقيلة، موجودة في الأشعة الكونية التي كانت تصدم المركبة الفضائية، ويبدو أن مقدار الطاقة الذي خلّفه كلٌ من هذه النوى في شبكية عين رائد الفضاء، أكبر من الحد الأدنى اللازم لتنبيه خلايا الشبكية الحساسة للضوء.

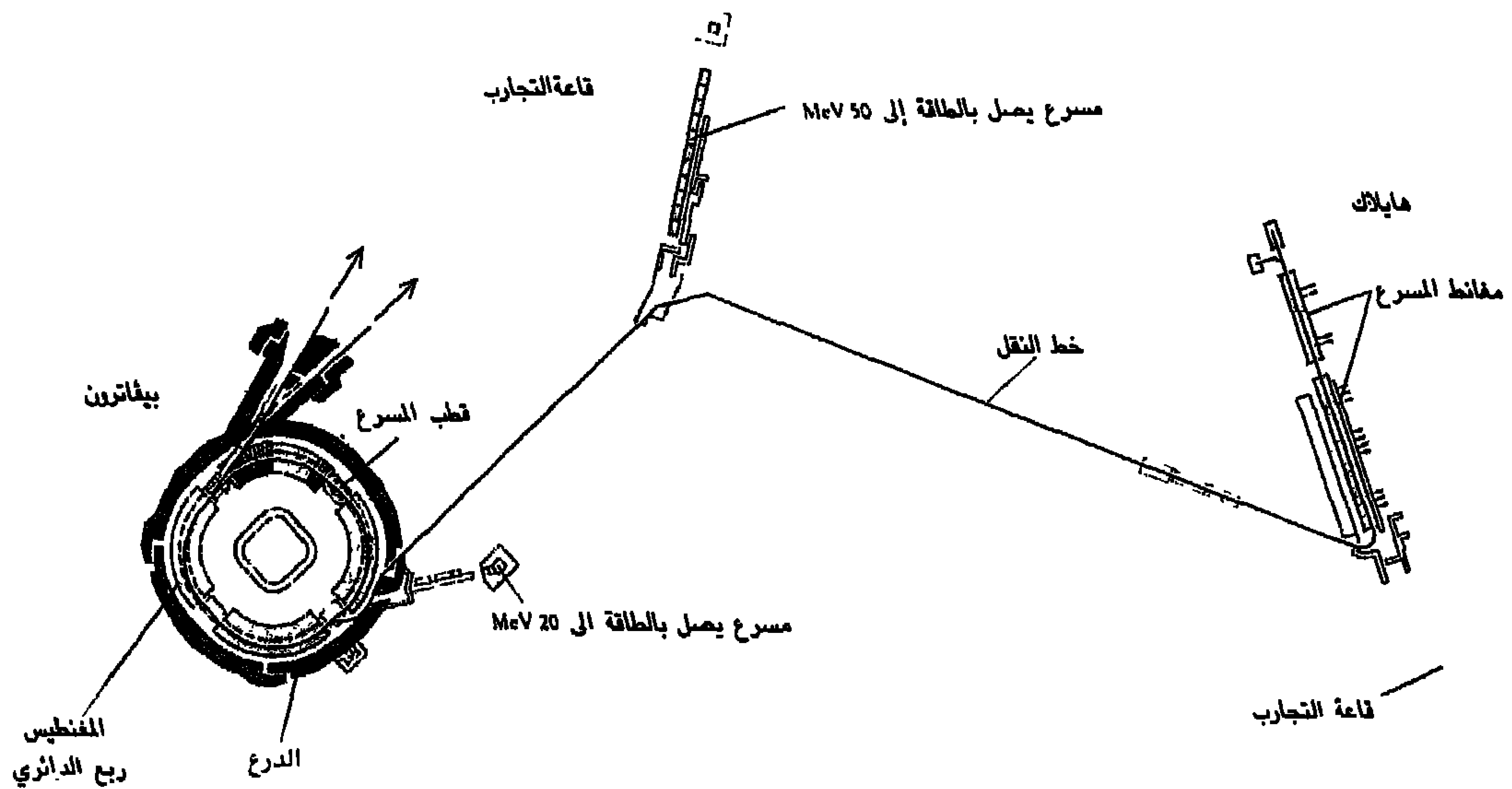
وسرعان ما اختبرت هذه الفرضية عقب الرحلة. وكان قد عُدّل حديثاً، في مختبر لورنس بيركلي التابع لجامعة كاليفورنيا، مُسَرِّع (بيفاترون) Bevatron (وهو مُسرِّع بروتوني عالي الطاقة بُني في أوائل الخمسينيات) بحيث أصبح قادراً على تسريع النوى، الأثقل من البروتونات المنفردة. وقد تطوّع (إ.م. ماكميلان) Edwin M. Mcmillan، الذي كان مدير المختبر آنذاك، بوضع رأسه في طريق حزمة ضعيفة الشدة من نوى ثقيلة عالية الطاقة. فرأى ومضات من نفس النوع الذي كان رواد الفضاء قد رأوه.

وقد أبدت التصادمات العالية الطاقة بين النوى، منذ ذلك الحين، خواصَ أكثر صعوبة في التفسير. فمثلاً، تولد التصادمات ما يسمى (أنومالونات) Anomalons: وهي شظايا نووية تتصادم ثانية على مسافة تبعث على الحيرة لقصرها. ويقال إن بعض خواص تلك التصادمات تُظهر (تَسرُّباً) للقوة التي تربط (النكليونات) Nucleons (البروتونات والنترونات) في النواة. وبالفعل يقال إن التصادمات قد تُظهر فعالية الكواركات، وهي المكونات النظرية ــ التي لم تشاهد ــ للبروتونات والنترونات. ويبدو مؤكداً أن درجات الحرارة والضغوط القصوى التي تولدها التصادمات العالية الطاقة بين النوى توجد حالات جديدة من المادة النووية، مثل الحالة التي كان فيها الكون عندما كان عمره يقدر بأجزاء من مليون من الثانية.

ما الذي يُميز التصادمات العالية الطاقة بين النوى، فَجَعل الومضات ــ التي يمكن أن تُحدثها في العين ــ تُكْتَشَف في الفضاء، ولم يكتشفها، مثلاً، شخص كان يحاول النوم في طائرة؟ يكمن الفرق الأكبر في معدل خسارة النواة للطاقة في المادة عند التصادم. إن هذا المعدل يتناسب مع مربع الشحنة الكهربائية للنواة «القذيفة» المشاركة في التصادم. وعلى هذا فإن نواة الحديد في الأشعة الكونية، التي صارت ــ بعد أن جُرِّدت من الإلكترونات التي كانت تشكل جزءاً من ذرة الحديد ــ أيوناً شحنته إيجابية قدرها 26 وحدة، تُخلِّف طاقتها بمعدل أكبر بـ26^2 أي 676 مرة من معدل بروتون الأشعة الكونية الذي له نفس السرعة. وإضافة إلى هذا، من المرجَّح تحطم النوى الثقيلة في الأشعة الكونية لدى اصطدامها بنوى الغازات في طبقات الجو العليا وهذا ما يكفل عدم توغل النوى الثقيلة (من الأشعة الكونية) في طبقات الجو الدنيا.

وقبل رحلة أبولو 11 بمدة طويلة، حمل معدل فقدان الأيونات الثقيلة للطاقة علماء الطب على الانتصار لمُسرِّعات الأيونات الثقيلة العالية الطاقة. ففي رأيهم أن صدمة واحدة بأيون كهذا قد تقتل خلية سرطانية بدلاً من تعطيل نشاطها فحسب. (إن الضرر البيولوجي الذي تحدثه معظم أنواع الإشعاع ناجم عن إنتاج (فوق الأكاسيد) ــ Peroxides ــ و(الجذور) Radicals الكيميائية الأخرى في الخلايا). وبحلول أوائل السبعينيات كانت عدة مُسرِّعات للأيونات الثقيلة جاهزة، إلا أن مدى حزمها في الأنسجة كان بضعة مليمترات على الأكثر. وإن رفع الأيونات إلى طاقات أكبر قد يتطلب «حلقات» للمسرعات، كتلك التي يستخدمها فيزيائيو الجسيمات الأولية.

وفي ذلك الوقت كان الفيزيائيون يستعدون على مضض لإيقاف المسرعات القديمة كالبيفاترون. وعوضاً عن ذلك ظهر استعمال جديد: فقد أُنشئ خط نقل مفرغ من الهواء بحيث يستطيع المسرع الخطي للأيونات الثقيلة (هايلاك) HILAC، الموجود في بيركلي أيضاً، قَذْف حزمته إلى البيفاترون. وهكذا فإن الأيونات

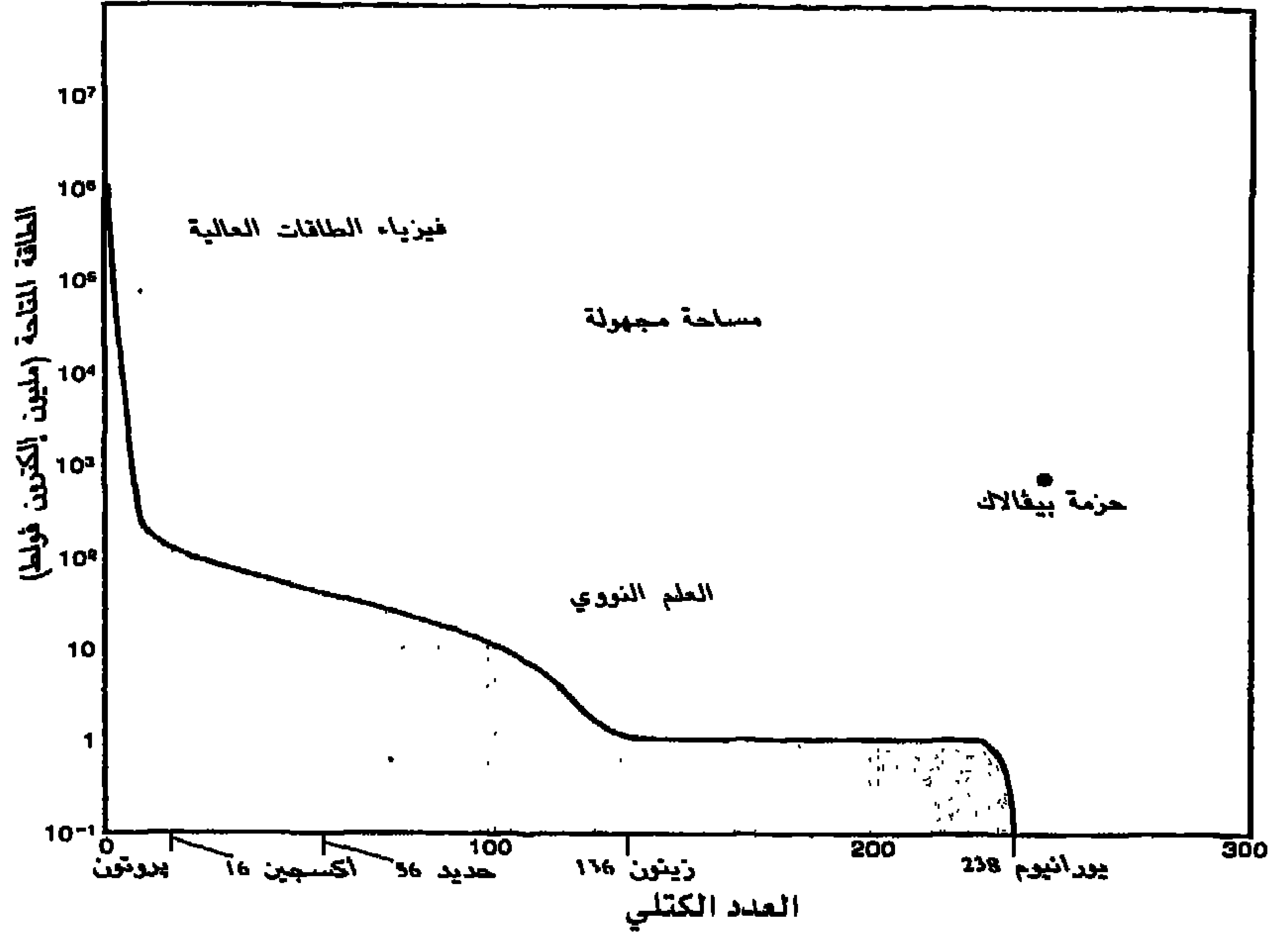


مسرع النوى الثقيلة في بيركلي هو في الواقع مسرعان موصولان بخط لنقل الحزمة. لقد أنشئ البيفاترون (إلى اليسار)، وهو مسرع رَحَوي (حلقي) قطره 100 قدم، في أوائل الخمسينيات. وقد صمم ليسرع البروتونات إلى GeV 6. وبحلول السبعينيات آل إلى الإهمال. ثم تبين أنه قادر على تسريع النوى الثقيلة. واليوم يقوم هيلاك، أي المسرع الخطي للأيونات الثقيلة، بتسريع النوى إلى طاقة قدرها MeV8.5 لكل نكليون (بروتون أو نترون). ويرفع البيفاترون هذه الطاقة إلى GeV 2 للنكليون وهذا يقابل سرعات عظيمة تبلغ 95 بالمئة من سرعة الضوء. إن اتحاد (انضمام) البيفاترون وهايلاك هو ما يسمى بيفالاك.

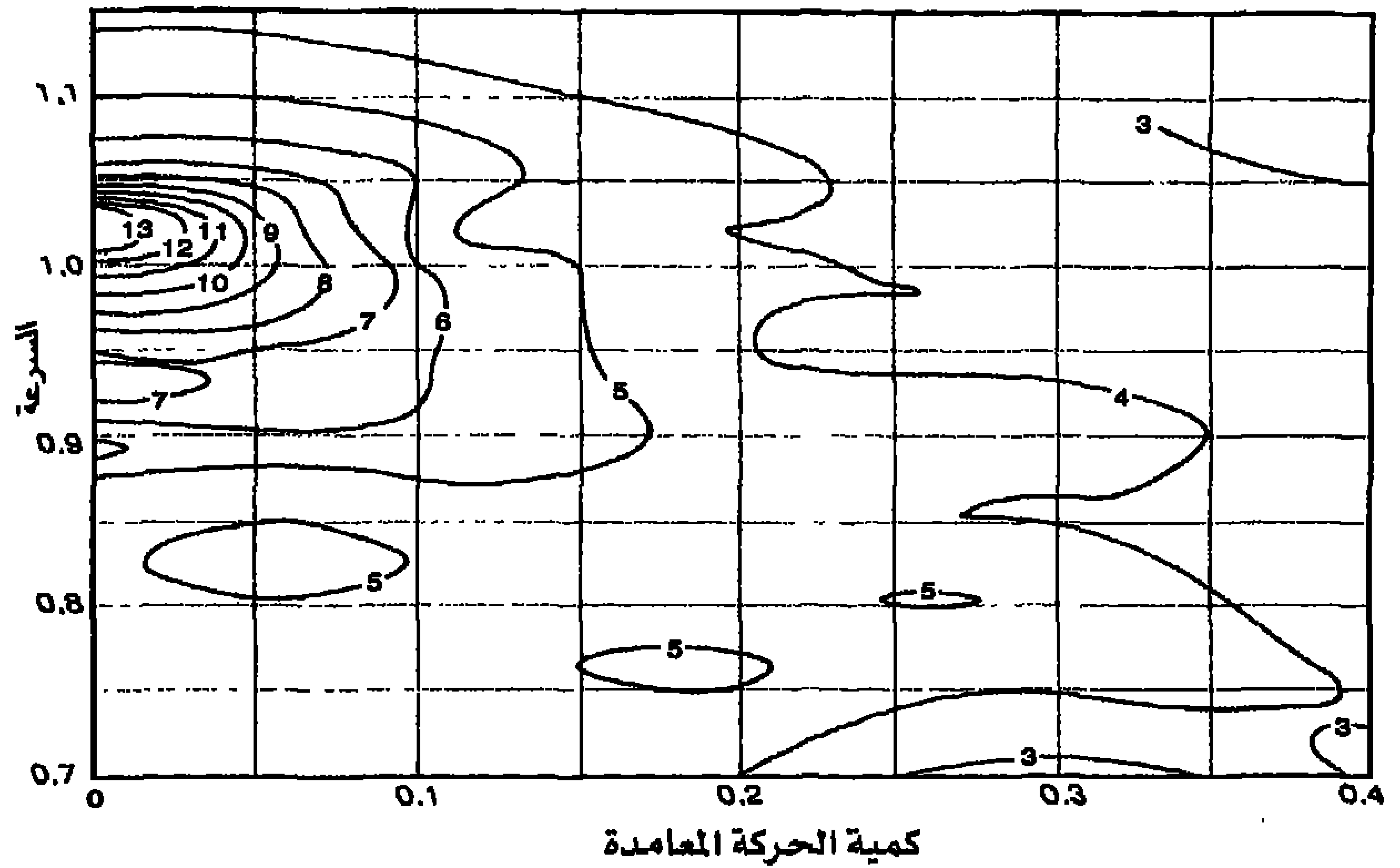
الخارجة من هايلاك، بطاقة قدرها 8.5 MeV للنكليون (أي 8.5 مليون إلكترون فولط لكل بروتون أو نترون في النواة)، يمكن أن تُسرّع أكثر، إلى طاقات عالية من مرتبة GeV 2ــ بليوني إلكترون فولط ــ للنكليون. وبذلك استطاعت الآلتان المتحدتان، اللتان سُميتا معاً (بيفالاك) Bevalac، للمرة الأولى تسريع النوى الثقيلة في المختبر إلى سرعات عظيمة تبلغ 95 بالمئة من سرعة الضوء، ومن ثم إكسابها طاقات قريبة من طاقات الأشعة الكونية. تسمى هذه السرعات والطاقات (نسبوية) Relativistic، لأن الأجسام المتحركة بسرعة تساوي جزءاً غير صغير من سرعة الضوء تسلك السلوك الذي توقعته نظرية النسبية الخاصة. وفي أثناء ذلك كان مُسرع «المعهد المشترك للبحوث النووية» في «دوبنا» بالاتحاد السوفييتي، وهو الجهاز المسمى (سنكروفازوترون) Synchrophasotron، قد بدأ تسريع نوى الكربون إلى طاقة تساوي ضعف الطاقة التي يستطيع البيفالاك إكسابها إياها. إلا أن الحزمة كانت أقل شدة.

وفي الوقت الذي جرت فيه هذه التطورات حدث تجديد في الفيزياء النظرية كان يمهد لفهم تركيب المادة على مستوى أعمق: فقد كانت نظرية الــ (كوارك) Quark في الجسيمات الأولية تأخذ شكلاً لتفسير البنية الداخلية للبروتونات والنترونات. وكان معروفاً في ذلك الحين أن نواة الذرة مكونة من بروتونات ونترونات في مجموعة من (قشور) Shells مدارية. أما الآن فقد أصبح من المؤكد أن كلاً من البروتون والنترون يتكون من ثلاثة كواركات. وأن البروتون مكون من كواركين «فوقيين» وكوارك «تحتي» في حين يتكون النترون من كواركين «تحتيين» وكوارك «فوقي». وللكوارك شحنة كهربائية كسرية: فشحنة الكوارك التحتي ــ مقدرة بوحدات شحنة البروتون ــ تساوي 1/3− وشحنة الكوارك الفوقي هي 2/3+. وفي هذا الوقت أجابت نظرية الكوارك عن بعض الأسئلة الأساسية حول مزيج الحالات الذي يقتضيه اتحاد البروتون والنترون لتكوين «الدترون» (وهو نواة الهدروجين 2). وعلاوة على ذلك فإن نظرية الكوارك وفرت الفهم الثاقب الذي بدونه لم يكن بالإمكان فهم بعض الأحداث في التصادمات العالية الطاقة بين النوى.

وإنه لمما يبعث على الرضا أن نشير إلى أن الإمكانات الجديدة لإنتاج حزم نووية ثقيلة عالية الطاقة تسد ثغرة في معارفنا. تأمّل مخطّطاً ترسم فيه الطاقة التي يمكن اكساب الجسيمات إياها في المختبر مقابل كتل هذه الجسيمات. لقد أحرز فيزيائيو الطاقات العالية تقدماً على طول محور الطاقة باستعمال حزم مكوّنة من جسيمات منفردة: عادة حزم من الإلكترونات والبروتونات والميزونات أيضاً، وهذه الأخيرة صنف من الجسيمات كتلها متوسطة بين الإلكترون والبروتــون. وعلى النقيض من ذلك أحرز



إن العلم الجديد الذي تستكشفه التصادمات العالية الطاقة بين النوى يتجلى بوضوح إذا مثلنا بيانياً الطاقة التي تكتسبها الجسيمات في المختبر (المحور الشاقولي/الرأسي) بدلالة كتل هذه الجسيمات (المحور الأفقي). فأعلى الطاقات قد أعطيت لأصغر الجسيمات كتلة (وهي جسيمات تحت الذرية في الأغلب)، وبذلك تركت مساحة مجهولة تشغل معظم المخطط. إن طاقة حزمة نوى اليورانيوم 238 في البيفالاك (النقطة الملونة) تضع هذه الحزمة في مكان جيد في المنطقة المجهولة.

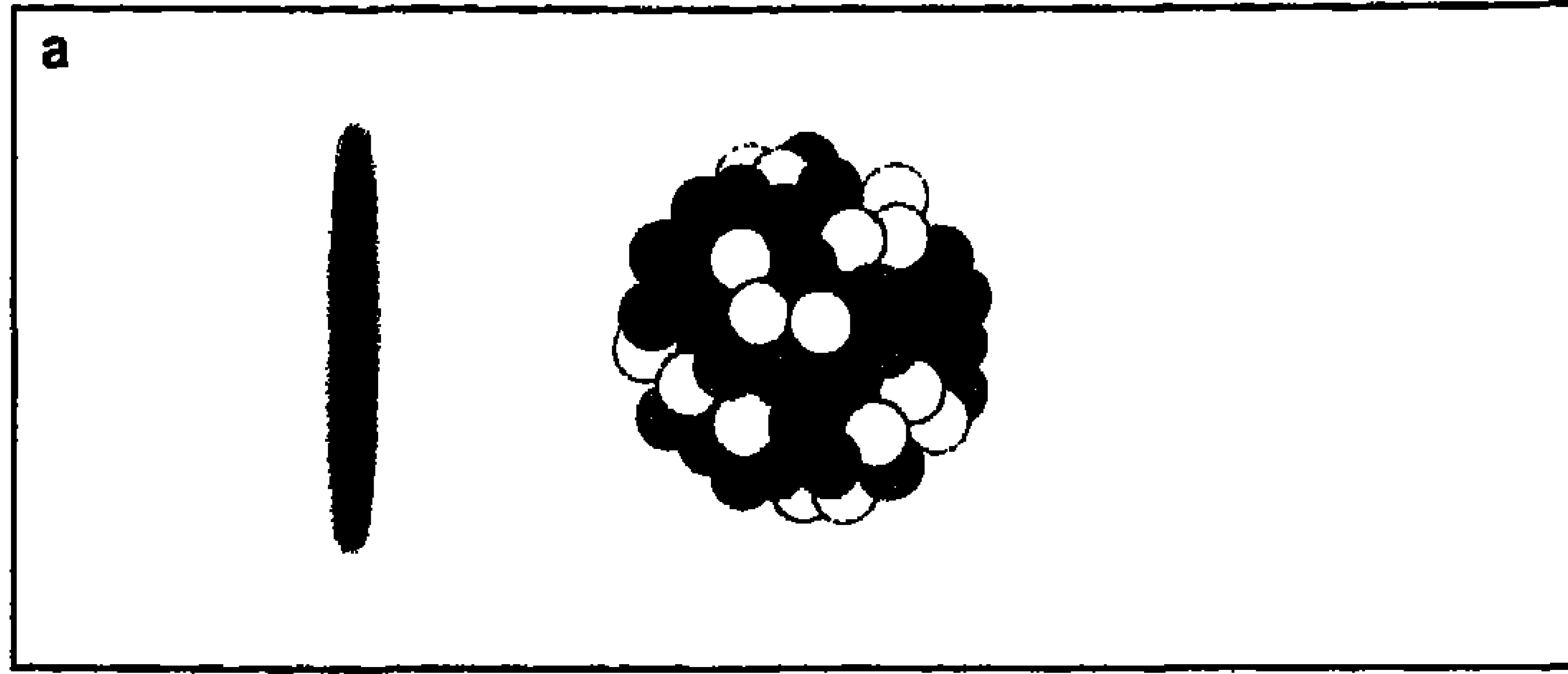


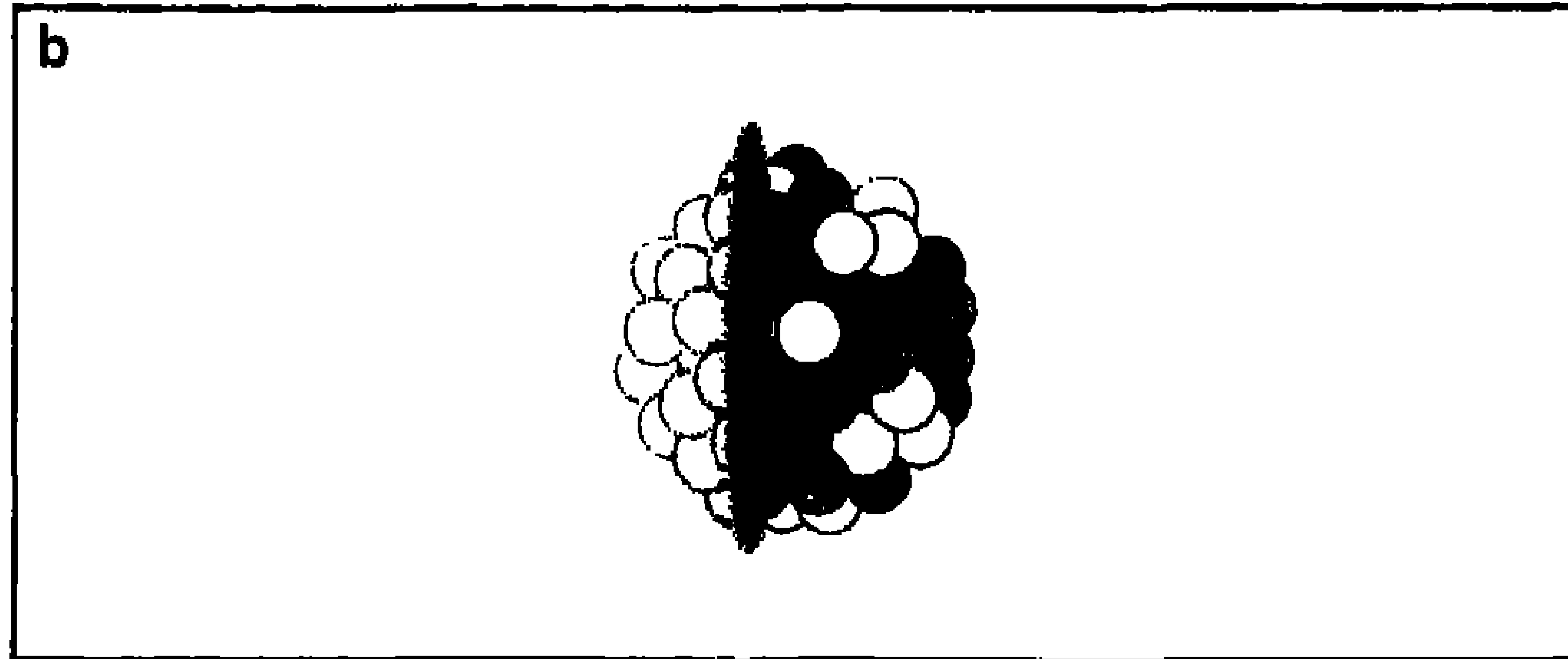
إن تركيز البيونات هو صفة مميزة للتصادمات العالية الطاقة بين النوى. فمثلاً، تُنتج حزمة من الأرغون 40 طاقتها 21 GeV، لدى صدمها هدفاً من كلوريد البوتاسيوم في البيفالاك، بيونات سالبة تتجمع بحيث تساوي سرعتها سرعة الحزمة تقريباً. وجوهر الأمر أن الشظايا النووية الأكثر ثقلاً، الناجمة عن التصادمات والتي لها شحنة موجبة، تجذب البيونات السالبة. ويمثل المخطط السرعة وهي مقياس مناسب للسرعات القريبة من سرعة الضوء، بدلالة الاندفاع المعامد لاتجاه الحزمة. وتبين «الخطوط الكنتورية» الأعداد النسبية للبيونات السالبة.

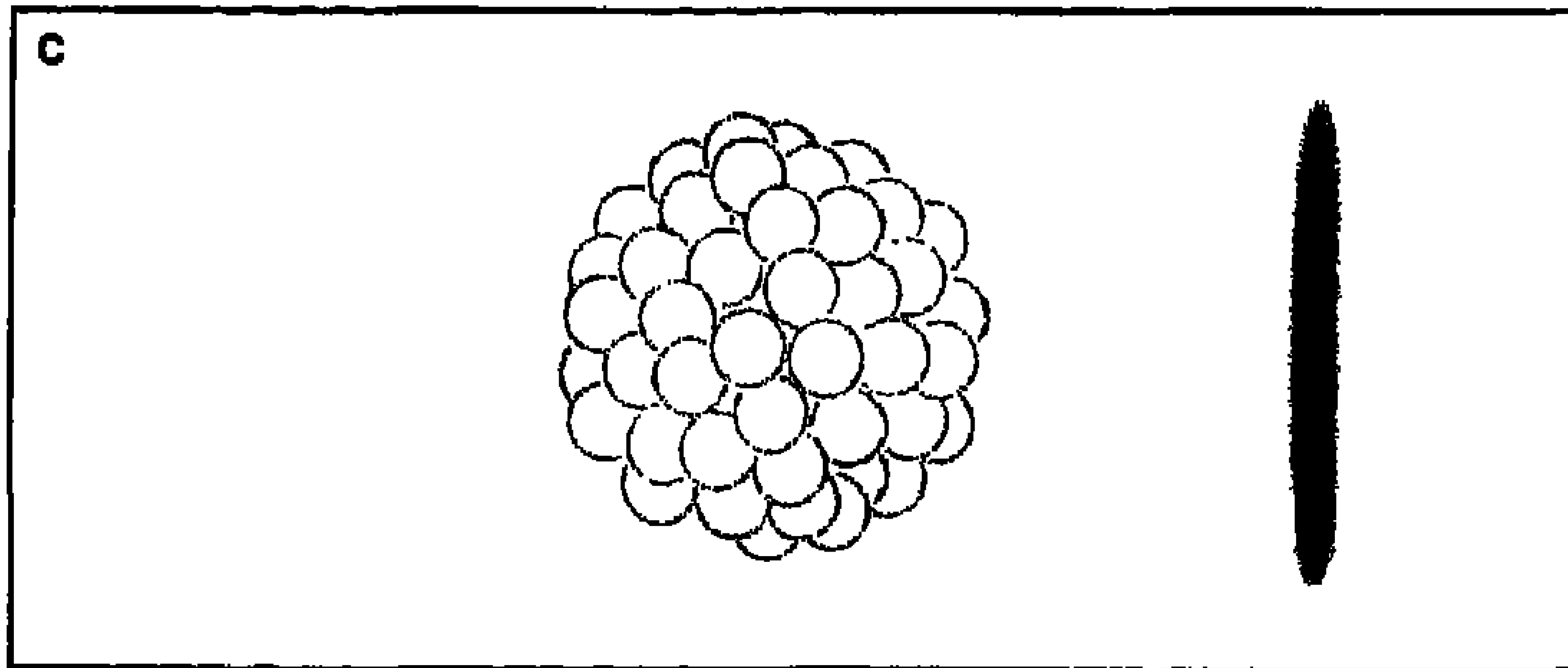
العلماء النوويون تقدماً على طول محور الكتلة، وهذا ما ترك المنطقة البعيدة عن كل من المحورين «أرضاً مجهولة» تنتظر استكشافها. لننظر الآن فيما أصبح معروفاً في هذه المنطقة.

يمكن تصنيف التصادمات، النِّسبوية الطاقة، بين النوى في ثلاث فئات: سطحية ووسطية ومركزية. ومع أن هذا التقسيم اختياري إلى حد ما، فإنه يمكن عموماً نَسبُ أي تصادم معين إلى هذه الفئة أو تلك. ففي التصادمات السطحية تمس النواة «القذيفة»، النواة أخرى «الهدف»، أو تمر قريبة من الهدف قرباً يسمح للنواتين بالتفاعل كهربائياً على الأقل. وتتابع قطعة كبيرة من القذيفة سيرها إلى الأمام. وفي التصادمات الوسيطة تضرب القذيفة الهدف ضربة غير (جبهية) Head on. فيمكن للقذيفة، مثلاً، أن تقص وتجرف نصف الهدف. وتتفكك هنا أجزاء كبيرة من كلتا النواتين. أما في التصادم المركزي فيكون التصادم جبهياً تقريباً. وعندئذ يتفكك المزيج الناشئ عن النواتين، وتسعى كمية حركة القذيفة لدفع الشظايا إلى الأمام.

يعود علينا فحص التصادمات السطحية فحصاً دقيقاً بالفائدة. ومن الممكن تسجيل نتائج التصادمات باستخدام مجموعة منوعة من الكواشف: المستحلبات الفوتوغرافية، وفيها يترك مرور الجسيم المشحون عبر غشاء من بروميد الفضة أثراً من الفضة المعدنية؛ وحجرة الفقاعات، وفيها يترك مرور جسيم مشحون عبر سائل







التقلص النسبوي هو صفة مميزة أخرى للتصادمات. ويمثل الشكل تصادماً افتراضياً عالي الطاقة بإفراط. تقترب نواة اليورانيوم التي طاقتها تريليون إلكترون فولط للنكليون من نواة اليورانيوم الساكنة (a). إن القذيفة التي تتحرك بسرعة تفوق 99.999 بالمئة من سرعة الضوء، تبدو كأنها قرص. وتتوقع نظرية النسبية الخاصة تقلصها هذا. ولا يدوم لقاؤها مع الهدف سوى 10^{-22} ثانية، وهو زمن أقصر بكثير من أن يتيح للنواتين بلوغ حالة توازن؛ وعلى هذا تمر القذيفة عبر الهدف (b). ومع ذلك فإنها تسخنه إلى أكثر من تريليون درجة حرارة (c). إن درجات حرارة كهذه يمكن أن تقارب درجات حرارة الكون مباشرة عقب الانفجار الأعظم.

مضغوط مفرط التسخين أثراً مكوناً من فقاعات (جوهر الأمر، يُسبب الجسيم المشحون غلياناً موضعياً)؛ وحجرة الجريان وفيها يترك مرور جسيم مشحون عبر غاز تحت تأثير فولطيةٍ عالية أثراً مكوناً من جريانات أو تفريغات كهربائية. وتؤكد كل هذه الكواشف أن شظايا التصادم السطحي لها منحى يختلف قليلاً عن منحى القذيفة.

إن ما لا تستطيع هذه الكواشف وحدها إظهاره هو كمية حركة الشظايا أو سرعتها. ولتحقيق هذا الغرض يستعان بوسائل مُكَمِّلة: فيهيأ التصادم ليحدث في حقل مغنطيسي يحني مسارات الشظايا إذا كانت تحمل شحنة كهربائية. وكلما ازداد اندفاع الشظية نقص انحناء مسارها. ويمكن قياس هذا الانحناء من التسجيل المرئي لأثر المسار أو بوضع عدد كبير من كواشف الجسيمات حول مكان التصادم. وقد بينت القياسات أن لشظايا التصادم السطحي نفس سرعة القذيفة تقريباً. ويمكـن ربـط الاختلافـات الصغيرة التي تحدث فعلاً بحجم (أبعاد) الشظية: فالاختلاف الأعظم تبديه الشظايا التي تساوي كتلة الواحدة منها نصف كتلة القذيفة. وفضلاً عن ذلك، فإن الاختلاف في السرعة هو من مرتبة ذلك التغير الذي يطرأ على سرعة النكليون عندما يتهزهز في النواة. (يدعى هذا التهزهز حركة فيرمي ويكون، إلى حد كبير، بنفس القدر في النوى جميعها).

هذا ولا تبدي شظايا التصادمات السطحية ــ عندما تكون طاقتها أقل ــ سلوكاً بسيطاً كالذي ذكرناه. ففي حالة الطاقات الأقل تستطيع النوى المتصادمة أن تبقى في حالة تماس مدة أطول بعدة مراتب من الكبر من المدة التي تستغرقها لتهتز، أو من المدة التي يحتاج إليها جسيم نسبوي ليعبر قطر نواة ما. لذا، وحتى في حالة تلاقٍ تماسي، إذا كانت النواتان منخفضتي الطاقة فإن أمامهما فرصاً للاندماج كلياً أو جزئياً. وفي الواقع تكوِّن النواتان قطرة سائلة من المادة النووية، طاقتها كافية لتبخير عدد من النكليونات في عدد من الاتجاهات وبعدد من السرعات.

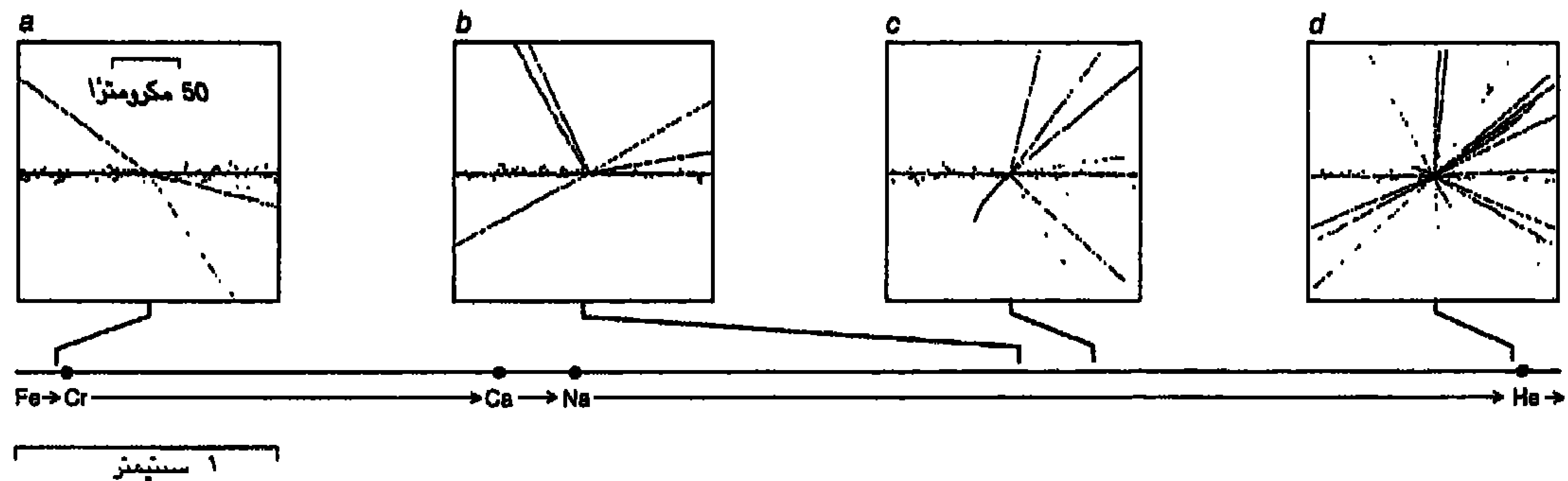
يتحول الكثير من طاقة التصادم العالي الطاقة بين نواتين، وعلى نحو نموذجي، إلى كتلة وذلك بالإنتاج الغزير لجسيمات غريبة تحت ذرية غير مستقرة، أبرزها البيونات، وهي أخف الميزونات. فقد تنبأ (هـ. يوكاوا) Hideki Yukawa في الثلاثينيات من هذا القرن بوجودها في النواة بصفتها «جسيمات افتراضية»، بحجة أن القوة الشديدة (التي تربط النكليونات في النواة) تحملها جسيمات تتبادلها النكليونات. وهذا التبادل قد يتعذر كشفه. لذا فإن البيون، الذي يَظهر تلقائياً (طَوْعاً) بصفة تراوح في حالة النواة يمكن أن يكون «افتراضياً»، لاحقيقياً. ومع ذلك فإن كتلة البيون، مُعبراً عنها بما يكافئها من طاقة، يمكن أن تكون 139 MeV.

وللبيونات المتولدة من التصادمات العالية الطاقة بين النوى خصوصية تلفت النظر، وهي أنه في التصادمات السطحية، يتجمع كهربائياً الكثير من البيونات السالبة: فالشحنة الموجبة للشظية المندفعة إلى الأمام تجذب الشحنة السالبة لكل بيون فيسعى لاكتساب سرعة واتجاه يماثلان سرعة الشظية واتجاهها إلى حد بعيد. وهذا أمر يمكن أن تكون له تطبيقات عملية. ففي لوس ألموس وفانكوفر وزيوريخ تستخرج مسرعات الجسيمات حزمة البيونات من تصادم حزمتين شديدتين من البروتونات العالية الطاقة؛ وربما كان إنتاج حزم البيونات اقتصادياً أكثر إذا استُعمل مسرع للأيونات الثقيلة. والأيونات الثقيلة المختارة هي نوى السليكون 28. فالذي يحدث في حالة البيونات ونوى السليكون 28، المتوغلة في المادة هو أن نسبة معدل فقدان الطاقة إلى الطاقة الكلية متماثلة في الحالتين. ولهذا السبب لا أهمية إطلاقاً للمكان الذي يولّد فيه التصادم البيونات داخل المادة: فتستطيع نواة السليكون 28 أثناء عبورها الهدف أن تصطدم بنواة في أي مكان داخل الهدف، وتبرز البيونات السالبة المتولدة مُجمّعة تجميعاً حسناً، من حيث السرعة، مع البيونات الناجمة عن التصادمات الأخرى.

وهناك نتاج آخر للتصادمات السطحية العالية الطاقة بين نواتين (والتصادم الوسيط العارض) أكثر غموضاً من البيون، وهو الأنومالون: وهو شظية من القذيفة، مسارها الحر الوسطي (أي المسافة التي تقطعها بين تصادمين) قصير على نحو شاذ. ولعلنا نَصِف الأنومالون وصفاً أفضل إذا قلنا إنه نواة تتفاعل قبل الأوان. ولقد تجمعت خلال العامين الماضيين أدلة تجريبية على أن الأنومالون موجود فعلاً. إلا أن التجارب كانت مُضجرة: فهي تتطلب تَقَفّي سلسلة من التصادمات، على الأغلب بفحص مستحلبات فوتوغرافية تحت المجهر. وفضلاً عن ذلك فإن طبيعة الأدلة نفسها، المكوّنة ـ كما هي الحال ـ من عدد صغير من تصادمات تبدو أنها حدثت قبل أوانها، تفتح باب الخلاف. والمجتمع العلمي النووي منقسم اليوم إلى معسكرين: المعتقدين والمنكرين. فلماذا سببت الأنومالونات كل هذا الاهتمام والجدل؟ إذا كانت موجودة فعلاً، يمكن جداً أن يترتب عليها نتائج بعيدة المدى، لا في العلم النووي فحسب، بل في فيزياء الجسيمات الأولية أيضاً، ومن ثم في النظريات المتعلقة بالبنية الأساسية للمادة.

لقد لوحظت الأنومالونات أول مرة في أوائل الخمسينيات في السجلات الفوتوغرافية لتصادمات الأشعة الكونية. ففي حالات نادرة جداً كانت نواة ثقيلة من الأشعة الكونية تصطدم بنواة من المستحلب النووي مولدة «نجمة» (أي مجموعة آثار فوتوغرافية منبعثة من نقطة)، ثم تولد إحدى شظايا التصادم نجمة ثانية على مسافة أقصر بكثير مما يتوقع المرء: ربما سنتيمتر واحد أو سنتيمترين، لا عشرة سنتيمترات أو أكثر كما هو مألوف.

وفي وسع المرء أن يتخيل بسهولة مأزق الذين حاولوا تفسير هذه النتيجة الغريبة. لنفترض أننا أجرينا عدة مرات تجربة قيادة سيارة على طريق رئيسية بسرعة كبيرة ثم إخراجها عن الطريق إلى غابة فيها أشجار ضخمة تفصلها بعضاً عن بعض مسافات

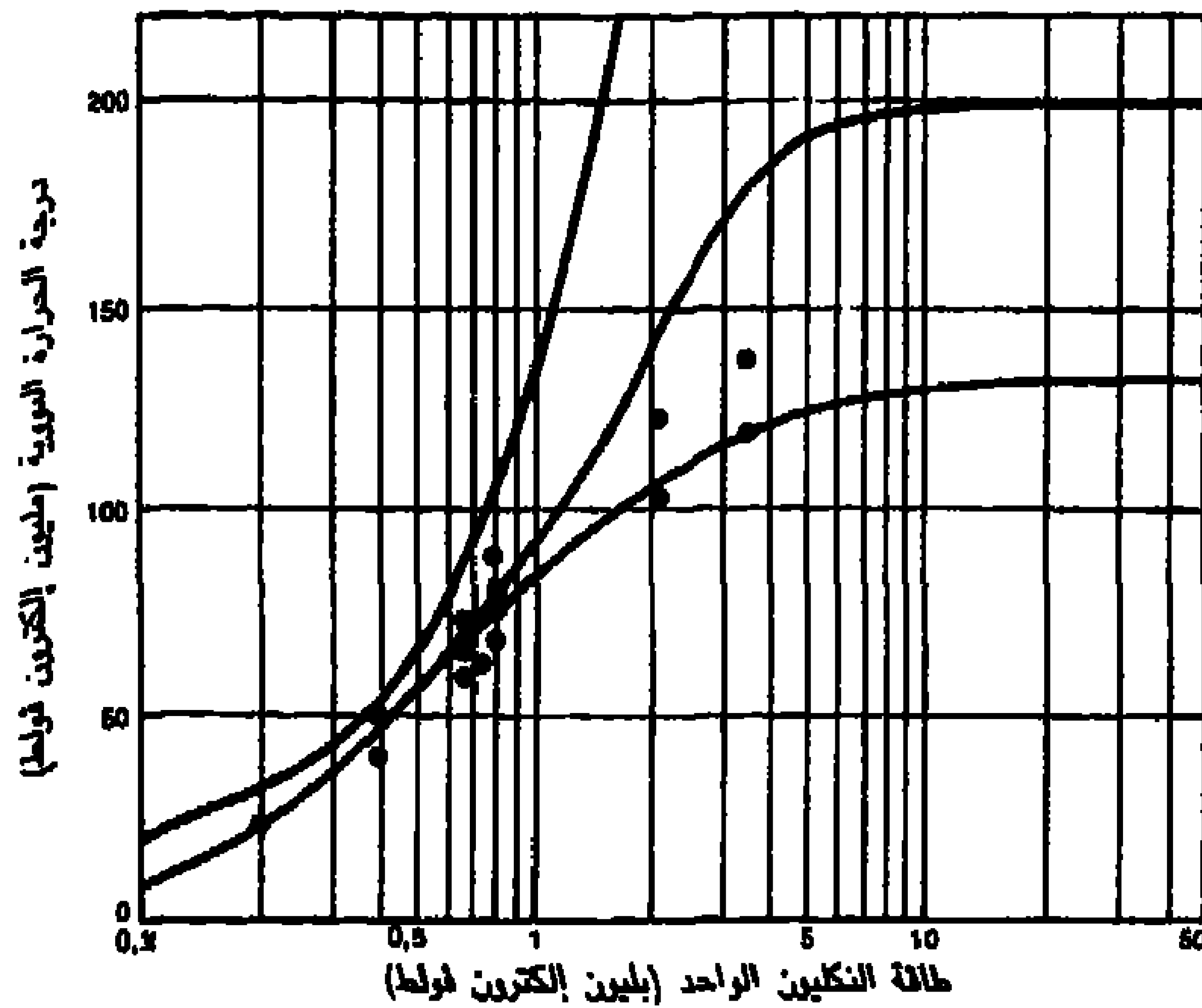


إن الأنومالونات هي مظهر للتصادمات العالية الطاقة بين النوى تكتنفه الأسرار، فهي شظايا نووية تقوم بتصادمات تالية (لاحقة) على مسافة قصيرة على نحو شاذ. ويعطي هذا الشكل مثالاً. تصطدم نواة الحديد التي طاقتها GeV 1.88 للنكليون بنواة في المستحلب الفوتوغرافي مولدةً نواة الكروم (a)، التي تقطع مسافة 1.62 سنتيمتر قبل أن تصطدم لتولد نواة الكالسيوم (b). ويمكن للمرء أن يتوقع متوسطاً لمسافة مقطوعة قدره 10 سنتيمترات أو أكثر. ولكن بعد 0.3 من السنتيمتر تصطدم نواة الكالسيوم وتولد نواة الصوديوم (c). وهنا أيضاً كانت المسافة المقطوعة قصيرة على نحو شاذ، إذ بعد 3.75 سنتيمتر اصطدمت نواة الصوديوم فولدت، بصورة فذة تماماً، نواة الهيليوم (d). لقد سُجلت سلسلة التصادمات هذه في البيفالاك.

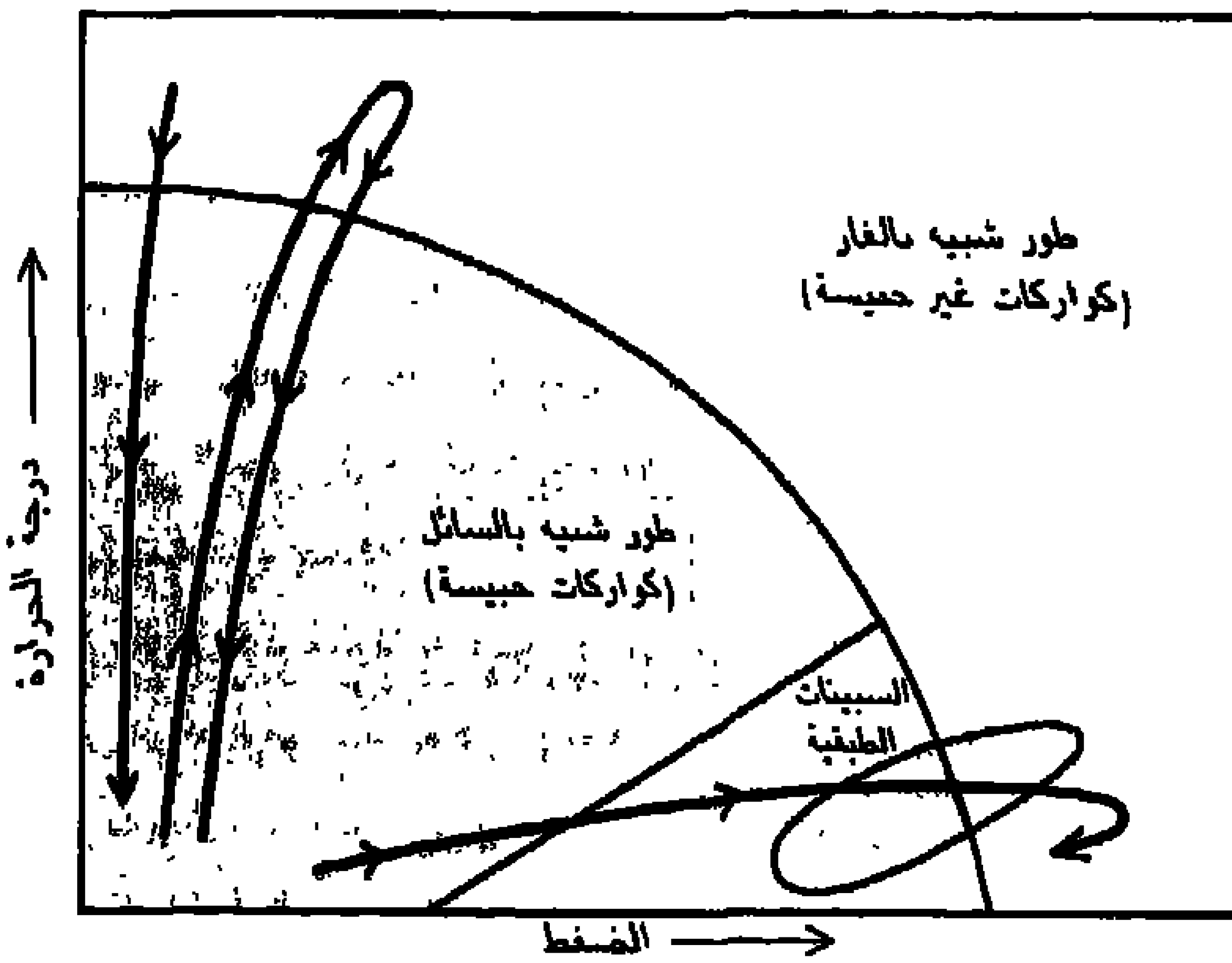
عشوائية. فأحياناً يحدث التصادم على الفور تقريباً، وأحياناً يحدث ذلك بين عدة أشجار فنقطع – من ثم – مسافة أطول. وبعد اختبارات عديدة نحصل على مسافة متوسطة تتوقف على عرض السيارة وعلى متوسط المسافة الفاصلة بين الأشجار. وفي مجموعة تالية من التجارب نأتي بسيارات، مماثلة للأولى ظاهرياً. والفارق الوحيد المعروف بينها هو أنها قد أُصلحت بعد اصطدام سابق أو أكثر. لسوف يدهشنا أن نجد أنها تصدم الأشجار بعد مسافة متوسطة تساوي عُشر المسافة التي قطعتها السيارات الجديدة (الأولى). من الواضح أن شيئاً غريباً قد حدث إذ تتصرف السيارات، بعد أول اصطدام لها، كما لو أنها أعرض بكثير. ونودّ أن نَصِف سيارات كهذه بأنومالونات.

لقد جرى الإعلام بمشاهدة الأنومالونات. في السجلات الفوتوغرافية لتصادمات الأشعة الكونية، على نحو متقطع على امتداد الخمسينيات والستينيات. ثم أتاحت حزم بيفالاك الحصول بكميات كافية على سجلات لتصادمات عالية الطاقة بين النوى يمكن التحكم فيها، فصار يمكن تعيين خواص الأنومالونات. وقامت ثلاث مجموعات، الأولى في مختبر لورنس بيركلي، والثانية في المجلس الوطني للبحوث في أوتاوا، والثالثة في جامعة ولاية نيويورك في (بافالو) Buffalo، بفحص المستحلبات الفوتوغرافية التي سبق تعريضها لحزم البيفالاك المكونة من نوى مختلفة، ذات طاقات مختلفة، اتسع نطاقها حتى شمل نوى الحديد 56 التي طاقتها GeV 1.88 للنكليون. ثم قامت مجموعة في جامعة مينيسوتا بإعادة فحص سجلات الأشعة الكونية. ومنذ سنتين، عندما عقدت في بيركلي الحلقة الدراسية العالمية الأولى حول الأنومالونات، أوصلت الجهود المشتركة إلى النتائج الآتية:

أولاً: للأنومالونات، بالفعل، مسارات حرة متوسطة قصيرة على نحو شاذ. فمن بين شظايا القذيفة، التي تقفّت آثارها المجموعات المختلفة، كان هناك نسبة مئوية صغيرة (6 بالمئة تقريباً، برغم أن الأرقام التي قُدمت راوحت بين 3 و10 بالمئة) لها مسارات حرة متوسطة لا تزيد على 2.5 سنتيمتر، أي أقصر من عُشر مسارات القذائف، ثانياً: لم تلاحظ الأنومالونات إلا عندما تجاوزت طاقة القذائف GeV1 للنكليون. (أجري قليل من البحوث بطاقات تقل عن GeV 1.8 للنكليون، ولهذا فإن القيمة الدقيقة للعتبة الطاقية كانت غير أكيدة). ثالثاً: يجب أن يكون عمر الأنومالونات من مرتبة 10^{-10} ثانية على الأقل؛ وإلا لما قطعت 2.5 سنتيمتر. إن العمر المذكور أطول بـــ13 مرتبة تقريباً من الزمن اللازم لحادثة مثل اهتزاز النواة. رابعاً: إذا كانت الأنومالونات تتفكك تلقائياً في أثناء حركتها، فلا بد أن يصاحب هذا التفكك إصدار جسيمات متعادلة كهربائياً فقط، وبالتحديد نترونات أو أشعة غاما (وهي كموم الإشعاع الكهرمغنطيسي العالي الطاقة)، إذ لم تُشاهد جسيمات مشحونــة منبعثة من مسارات الأنومالونـــات عبـــر المســـتحلبات



يستفاد من درجات الحرارة النووية، التي يتوصل إليها في التصادمات بين النوى عند طاقات البيفالاك لسبر أغوار مختلف نماذج المادة النووية في الظروف الحدية. إن هذه المنحنيات هي حسابات نظرية تشمل افتراضات مختلفة تتعلق بالمادة النووية. أحد هذه الافتراضات (المنحني الأسفل) هو أن تسخين النوى يحول كل الطاقة المتاحة إلى مادة: أي (هيبيرونات) Hyperons، وهي حالات مثارة للنكليونات. وتستطيع الهيبيرونات بعدئذ أن تتفكك إلى نكليونات وبيونات. والافتراض المعاكس (المنحني الأعلى) هو أن التسخين يحدث دون أن يحول النكليونات مطلقاً إلى جسيمات أخرى. أما الافتراض الثالث (المنحني الأوسط) فهو متوسط بين الآخرين. وقد عُبر على المخطط عن درجات الحرارة جميعاً بمكافئها من الطاقة الحركية بالـ MeV.



يبين المخطط الطوري الافتراضي أشكال المادة النووية التي يمكن أن تنشأ في ظروف من درجة الحرارة والضغط تتغير ضمن حدود واسعة. تكون النوى العادية في الطور الشبيه بالسائل (الرمادي الداكن): فهي «مائع» من النترونات والبروتونات. وفي درجات الحرارة والضغوط العالية جداً قد تتفكك إلى كواركات وغلوونات، أي إلى مكوناتها الافتراضية (الرمادي الفاتح). وعند قيم مناسبة من الضغوط العالية ودرجات الحرارة المتوسطة ربما تشكل طور ثالث، تكون فيه سبينات النكليونات منتظمة في طبقات (الرمادي الوسط). إن أحد المسارات على المخطط يتبع تطور المادة النووية في الكون الممعن في القدم (البدائي) (a). ويتبع المسار الثاني (b) تطور المادة النووية في انفجار مستسعر أعظمي. أما المسار الثالث (c) فيتبع تطور المادة النووية في تصادم مركزي بين النوى. ويمكن أن ينفتح أمام التصادمات السطحية عالم مختلف (المنطقة الملونة).

الفوتوغرافية. خامساً: تبدو خواص الأنومالونات مستقلة عن مقدار شحنة الشظية. ومع ذلك هناك أدلة ضعيفة توحي فعلاً بأن الأنومالونات التي تحمل وحدة أو وحدتين من الشحنة لا تتكون أبداً.

سادساً: وربما كان هذا أغرب شيء، تُبدي الأنومالونات ظاهرة الذاكرة التي يمكن التعبير عنها بـ «إنْ وُلد الأنومالون، فإنه يبقى أنومالوناً على الدوام». وبتعبير أدق يبدو أن الشظية التي تنبعث من نجمة يُحدثها الأنومالون يكون احتمال كونها هي نفسها أنومالوناً، أكبر مما لو أنها انبعثت من نجمة أحدثها شيء آخر غير الأنومالون. فإما أن الأنومالونات لها فرصة جيدة في البقاء بعد التصادم، وإما هناك شيء يتعلق بالأنومالونات يجعل من السهل نسبياً إعادة إنتاجها في التصادم.

إنها حقاً مجموعة من الخواص. وفي خلال السنتين الماضيتين قامت مجموعات في مختبرات منتشرة في العالم (مصر، ألمانيا، الهند، إيطاليا، السويد، سويسرا، الاتحاد السوفييتي) بفحص سجلات فوتوغرافية من بيفالاك وsyncrophasotron فتحسنت بذلك الإحصائيات الخاصة بالأنومالونات. وعلاوة على ذلك، بدأ بعض المجموعات باستخدام كواشف جديدة، الجدير بالذكر منها «كاشف الأثر اللدائني». فبعض اللدائن تصيبها الأيونات الثقيلة بأضرار. ولهذا يعرَّض رصيص من رقائق من لدينة كهذه للأيونات ثم تحفر كيميائياً. تُوسع هذه المعالجة مواضع الأضرار إلى حُفر مخروطية بالغة الصغر ترسم مسار الأيون. والمزيّة الكبرى لهذه الطريقة هي أنه في حالة أيونات ذات سرعة معينة يكون قطر الحفرة مقياساً للشحنة، ويمكن قياس أقطار الحُفر بأجهزة مسح تعمل بالحاسوب. وفي الحلقة الدراسية العالمية الثانية حول الأنومالونات، التي عُقدت في بيركلي في الصيف الماضي، اتفق المشاركون على أن قائمة الخواص الست ماتزال قابلة للتطبيق، على الرغم من أنه لم يبرهن عليها تماماً. وإضافة إلى هذا أخبرت عدة مجموعات بأن الشحنة الكهربائية للأنومالونات تبدو دائماً من مضاعفات وحدة الشحنة الكهربائية. ومن ثم يمكن إضافة خاصة سابعة هي: لا تحمل الأنومالونات شحنات كهربائية كسرية. وبعبارة أخرى يبدو أن الأنومالونات لا تشتمل على كواركات تائهة.

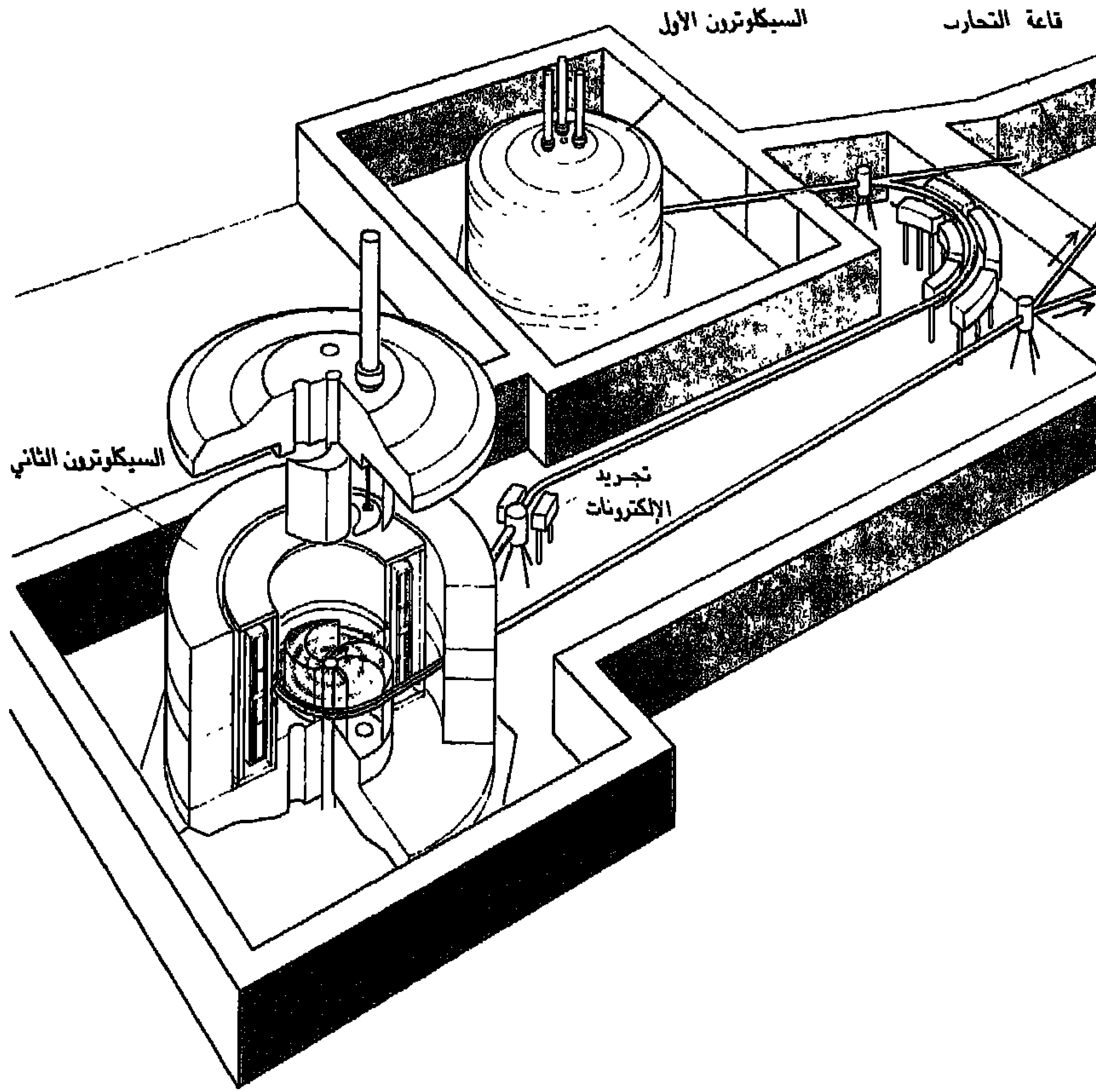
إن استنباط تفسير نظري مُرضٍ للأنومالونات، يكافئ ـــ على الأقل ـــ العمل التجريبي في الصعوبة والإرباك. وقد اقتُرحت نظريات كثيرة، ولكن ليس بينها حتى الآن نظرية تشمل الوقائع شملاً جيداً بحيث تعتبر صحيحة على وجه الاحتمال. وأكثر النظريات إثارة للعجب هي تلك التي «ترى» أن الأنومالونات هي مظاهر الكواركات. إن نظريات كهذه تقوم على التماثل. لنتأمل الرابطة الكيميائية، إنها تفاعل قصير المدى قابل للتشبع، أي أنه لا يربط سوى أعداد مخصوصة من الذرات المتجاورة. ومع ذلك فإن هذا التفاعل ينشأ عن قوة بعيدة المدى وهي الكهرمغنطيسية. والسبب في قصر مدى الرابطة هو أن شحنة النواة الكهربائية وشحنة الإلكترونات في الذرة متساويتان ومتعاكستان بحيث تلغي إحداهما مفعول الأخرى، عندما تكون الذرة بعيدة.

لنتأمل الآن الرابطة التي تمسك بالنكليونات معاً. إنها هي أيضاً قصيرة المدى وقابلة للتشبّع. ومداها العادي أصغر من أبعاد النواة. ومع ذلك فإنها هي أيضاً يمكن أن تنشأ عن قوة بعيدة المدى. وعلى هذا فإن الرابطة التي تشد النكليونات بعضها إلى بعض ليست قصيرة المدى، إلا لأن كلاً من الكواركات الثلاثة في النكليون له شحنة خاصة بالقوة الشديدة، تسمى «اللون» وهذه الألوان تتلاشى عادة.

تُقدم الأنومالونات أول أساس حقيقي للتخمين أن القوة الشديدة يمكن أن تتسرب إلى المدى البعيد. لذلك بُذلت محاولات لتصوير الأنومالونات على أنها حشد من الكواركات لا تتلاشى ألوانه، بحيث يُسهل التفاعل القوي البعيد المدى التصادمات ويقل في المتوسط المسار الحر للشظية النووية. وقد تدرجت المحاولات من (الدترون البارع) Demon Deuteron (وهو دترون يتكون من ثلاثة أزواج من الكواركات لا من ثلاثيتين من الكواركات) إلى مقادير وافرة من الكواركات التي لها شكل الكعكة. وليس هناك محاولة تتفق مع كل بنود قائمة خواص الأنومالونات. وليس أقلَّ الصعوبات الاكتشاف بأن الأنومالونات تتولد عند طاقات أخفض من تلك التي يتوقع المرء عندها إعادة ترتيب شاملة للكواركات أو إنتاجاً وافراً منها.

إن تفسيرات الأنومالونات، التي لا تعتمد على الكواركات، كانت أيضاً متنوعة. فهي تتدرج من النوى ذات الفقاعات (كرات جوفاء تتألف من النكليونات) إلى النوى الشّبه الجزيئية (وهي مجموعة لها شكل «الدمبْل» Dumbbell تنشأ عندما يتصل نكليونان ـــ أحدهما بالآخر ـــ دون أن يندمجا). والهدف من هذه النماذج هو جعل الأنومالون جسماً منتفخاً أو متضخماً بحيث يزداد احتمال إصابته في التصادم. وتتضمن التفسيرات اقتراحاً ابتكرناه بأنفسنا، وتتكون الأنومالونات بموجبه من بيونات سالبة مرتبطة بشدة بشظايا نووية غنية بالنترونات. فتستطيع البيونات أن تسحب النترونات في المادة النووية بالحمْل نحو الخارج، فتُوسِّع بذلك السطح، مُكسبةً الشظية نتوءات (حدبات). إن حجتنا هي أن التصادمات بين النوى تنتج كميات وافرة من البيونات، تتجمع السالبة منها حول الشظايا الكبرى. وإضافة إلى هذا نلاحظ أن البيونات تنجذب إلى البروتونات والنترونات بالتفاعل الشديد. والمعروف أن انجذاب البيونات السالبة إلى النترونات أكبر كثيراً منه إلى البروتونات.

ومشكلة نموذجنا هي أن أي تماس بين البيونات السالبة والبروتونات يجعل المادة تتفكك في أزمنة قصيرة بمقارنتها بعمر الأنومالونات. ومع ذلك شجعتنا حسابات نظرية حديثة توحي بأن الجسم المكون من بضعة بيونات سالبة وبضعة نترونات يمكن أن يكون عمره طويلاً إلى حد يكفي لكشفه. إن (بينوتات) Pineuts



إن السيكلوترونات المفرطة الموصلية في جامعة ولاية متشيغان هي أول أجهزة من هذا النوع، وسوف يقوم الثان منها بتسريع الأيونات الثقيلة إلى طاقات عظيمة تبلغ MeV 200 للنكليون. لقد تم تركيب أحدهما وهو الذي سوف يسرع الذرات المؤينة قليلاً على طول مسار حلزوني بين القطبين (اللذين لهما شكل مروحة) لمغنطيس مفرط الموصلية قطره 10 أقدام فقط. (إن قطر منطقة التسريع ذاتها هو 52 إنشاً فقط). وسوف توجه حزمة الأيونات الناتجة من خلال وريقة معدنية ــ تُجرِّد الذرات من كثير مما بقي لديها من الإلكترونات ــ إلى السيكلوترون الثاني، الذي سوف يسرع الأيونات تسريعاً إضافياً. وسوف يكون لهاتين الآلتين حجم وكلفة معتدلان بمقارنتهما بالمسرعات التي صنعت مؤخراً، ولكنهما سوف تولدان حزماً طاقتها، للنكليون الواحد، أكبر من طاقة معظم مسرعات الأيونات الثقيلة.

كهذه لم تشاهد قط، ولكن البحوث الجارية على مختلف مسرعات الأيونات الثقيلة قد يسعفها الحظ في العثور عليها. وفي الواقع، بدأ يتضح أن البيونات السالبة المرتبطة بالنواة يمكن أن تكون ظاهرة لا تختص بها نظرية للأنومالونات. إذ إن بعض المعلومات المحصول عليها بكواشف الجسيمات، تقتضي أن تكون البيونات قد دارت في فلك حول الشظايا النووية، ثم اندفعت مبتعدة عنها. وعلى هذا نخمّن أن الأنومالون هو هالة من البينوتات تحيط باللب النووي، وتخضع البينوتات لقوة نابذة تُبقيها بعيدة عن بروتونات اللب. ولعل النواة المطلوبة الغنية بالنترونات (أو المناطق الغنية بالنترونات في النواة) تفسّر ظاهرة الذاكرة التي لوحظت في الأنومالونات؛ لأن شظية نووية غنية بالنترونات من شأنها، في التصادمات اللاحقة، أن تميل إلى توليد شظايا إضافية غنية بالنترونات.

هل يمكن ملاحظة صلة بين البيونات السالبة المرتبطة بالنترونات، وتسَرُّب بعيد المدى للقوة الشديدة؟ حتى الآن تركزت الجهود، في معالجة النوى البسيطة باعتبارها تجمعاً كوراكياً، على مضاعفات الثلاثيات الكواركية. إن مضاعفات كهذه تكفل في النهاية إلغاء الشحنات اللونية بعضها بعضاً. فماذا عن الحسابات المبنية، مثلاً، على بيون سالب ونترونين؟ إن هذا التركيب هو أبسط بينوت وسوف يضم ثمانية كواركات: خمسة كواركات تحتية، وكواركين فوقيين وكوارك فوقي مضاد. (يعتبر البيون السالب مكوناً من تزاوج كوارك تحتي وكوارك فوقي مضاد) يبدو أن تجمعاً كهذا أقل حظاً في ضمان إلغاء الشحنات اللونية بعضها بعضاً، لذا يجب متابعة دراسته.

وللتصادمات العالية الطاقة بين النوى مظهر يجعلها واعدة في البحوث الكوزمولوجية (الكونياتية) بخاصة: فالمعدل العجيب الذي تستطيع به نواة ثقيلة عالية الطاقة أن تُخلف الطاقة في النواة الهدف، يوحي بأن النواة الهدف، يمكن أن تسخن إلى درجة حرارة قريبة من درجة حرارة الكون بعد الانفجار الأعظم بمدة قصيرة. ولا يمكن بلوغ درجات حرارة كهذه برَجم النوى الثقيلة بحزم من الإلكترونات أو البروتونات، إذ إن خفة هذه القذائف تعني أنها سوف تبدد جزءاً صغيراً فقط من طاقتها الحركية الكلية، حتى لدى مرورها بأثقل النوى. وعلى النقيض من هذا، يمكن لتصادم مركزي بين ذرتي يورانيوم أن يوقف القذيفة التي تتخلص بذلك من كامل طاقتها الحركية.

لقد تمكن تعاون ألماني أمريكي في بيفالاك من إجراء بحوث عن المدى الفعلي الذي تتوقف عنده النوى عند الطاقة القصوى لبيفالاك في التصادمات المركزية. فأنشؤوا قشرة كروية معقدة من العديد من الكواشف التي تعين كُلاً من الطاقة ومعدل فقدانها من الجسيمات الخارجة من الهدف. كما وضع جدار إضافي من الكواشف على بعد أمتار قليلة وفي اتجاه «تيار» الجسيمات الخارجة. وتشتمل «الكرة والجدار» معاً على أكثر من 1000 كاشف. وقد بينت المعطيات أن نوى الكالسيوم أصغر من أن توقف إحداها الأخرى إيقافاً كاملاً، في حين أن نوى النيوبيوم كبيرة إلى حد كاف.

إن مفهوم النواة التي لها درجة حرارة يتطلب تفسيراً، ودرجة الحرارة ــ عموماً ــ هي مجرد مقياس للحركات العشوائية في مجموعة جسيمات. وتتحول طاقة التصادم النووي ــ جزئياً على الأقل ــ إلى حركات عشوائية للنكليونات في النواة، فمن المناسب إذن التحدث عن درجة حرارة نووية. وبصورة أكثر تحديداً إلى حد ما، تتميز المادة الموجودة في حالة توازن حراري ــ سواء كانت مكونة من نكليونات، أو جزيئات، أو جسيمات عيانية (ماكروسكوبية) تتحرك عشوائياً ــ بأن تَوزُع السرعات فيها يتضاءل أُسيّاً. وبعبارة أخرى، المكونات العالية الطاقة (في هذه المادة) نادرة نسبياً. ويتناسب متوسط الطاقة الحركية مع درجة حرارة المادة T، معبراً عنها بدرجات كلفن، وثابتة التناسب هي ثابتة بولتزمان k. ويفضل العلماء النوويون عدم استعمال T، التي يمكن أن تأخذ قيماً غير ملائمة لضخامتها (بلايين الدرجات). ويستعملون عوضاً عنها، kT، أي متوسط الطاقة الحركية للنكليون.

لنضرب بعض الأمثلة. إن درجة حرارة سطح الشمس (T) هي نحو 6000 درجة كلفن. والطاقة الحركية المقابلة أي kT هي 0.5 إلكترون فولط. وهذا يعني أن للذرات على سطح الشمس طاقة حركية أصغر من الطاقة التي تحصل عليها الإلكترونات عندما تسرَّع ببطارية مصباح الجيب. (يدرك المرء من هذا أن الطاقة الحركية التي يحصل عليها الجسيم عند تسخينه لا تدعو إلى العجب عادة). ويعتقد أن درجة الحرارة في مركز الشمس هي 15 مليون درجة. والطاقة الحركية المقابلة هي 1300 إلكترون فولط أي تقريباً الطاقة التي تصدم بها الإلكترونات شاشة التلفاز. ويعتقد أن درجة الحرارة في مركز نجم عند تحولــه إلى «مستسعر أعظمي» Supernova تبلغ بضعة بلايين الدرجات. والطاقة الحركية المقابلة قريبة من 1 MeV، أي تساوي تقريباً الطاقة التي تُعطى للإلكترونات في أقوى المجاهر الإلكترونية. هذا هو الحد الأعلى لدرجات الحرارة التي تولدها العمليات النشيطة في الكون اليوم. ويعتقد أن درجات حرارة أعلى بكثير كانت سائدة في بداية نشأة الكون.

هل يمكن أن يحدث للمادة النووية أي شيء متميز إذا رُفعت إلى درجات حرارة نووية بالغة الارتفاع؟ لنتأمل ما يحدث للمادة العادية عند تسخينها. في البداية يكون معظم المادة صلباً. ولدى تسخينها تنصهر أي تصير سائلاً؛ ثم تغلي وتصير غازاً، ثم تتمزق جزيئاتها إلى ذرات. وأخيراً تُقتلع الإلكترونات من الذرات، بحيث إن الإلكترونات والنوى المؤيَّنة ــ التي يكون بعضها مجرداً تماما من الإلكترونات ــ تتحرك بحرية في غاز من جسيمات مشحونة: أي في البلازما.

يعتقد أن المادة النووية ليس لها طور صلب؛ وأنها تشبه السائل إلى حد كبير. ويتوقع المنظرون، مع ذلك، أن تُحدث درجة الحرارة العالية (أو الضغط العظيم) انتقالاً طورياً، تتفكك فيه النكليونات إلى كواركات وغلوونات: وهي الجسيمات التبادلية التي تربط الكواركات معاً. وربما كانت النتيجة شيئاً يشابه البلازما: إذ قد تتجول الكواركات المنفردة في أرجاء النواة بدلاً من قصر حركتها على «أكياس» الثلاثيات الكواركية.

إن هذه الأطوار الخاصة بالمادة النووية هي، بالطبع، تخمينية تماماً. وعلى الرغم من ذلك يمكن للمرء أن يزعم أنه يمكن الحصول ــ إضافة إلى الطور السائل الطبيعي، وطور البلازما المتوقع ــ على طور (المتكثف البيوني) Pion Condensate عند كثافات نووية عالية بدون درجات حرارة نووية عالية. ففي طور كهذا تصطف النكليونات في النواة في طبقات بحيث يكون (السبين) Spin ــ للنكليونات في طبقة ما، في اتجاه معين، ويكون سبين نكليونات الطبقة التالية في الاتجاه المعاكس. (إن «المتكثف البيوني» هو اسم مغلوط إلى حد ما، وله صلة بالاستقرار المحسوب لارتباط البيونات في المادة النووية الكثيفة). وهناك تخمين بأن مركز النجوم النترونية يمكن أن يكون مادة نووية في طور متكثف بيوني. ولسوء الحظ فإن الجهود لإنتاج طور كهذا على سطح الأرض تعوقها مشكلة إكساب المادة النووية كثافة عالية دون إكسابها درجة حرارة عالية.

على أي درجة من السخونة والكثافة يجب أن تكون المادة النووية لتصير بلازما كواركية ــ غلوونية؟ إن حساب الجواب، على أي درجة من اليقين، مهمة تشغل الآن حواسيب قوية. ومازالت النتائج غير جاهزة بعد، إلا أن أفضل التقديرات حتى الآن توحي بأن درجة الحرارة المقابلة لكثافات نووية طبيعية قد يلزم أن تقارب الــ200 MeV. ويتعذر على الأرجح تحقيق ظروف كهذه بمسرعات الأيونات الثقيلة الموجودة حالياً، ومع ذلك يجري إعداد تجارب ــ لأن هناك احتمالاً ــ للبحث عما يشير إلى أن البلازما الكواركية ــ الغلوونية قد تكون تشكلت فعلا.

إن عدداً من المسرعات، أحدث مما ذكرناه، يمكن أن تهيىء الآن فرصاً أفضل. وقد أنجز بعضها للتو، وبعضها الآخر يجري إنشاؤه في المختبرات المنتشرة في العالم. وبفضل المغانط المفرطة

الناقلية والتحكم الميكرو إلكتروني الذي يُعوّل عليه، يمكن لهذه المسرعات أن تكون أصغر حجماً وأرخص ثمناً مما كان يخشاه أنصارها. ومع ذلك فإن الحزم النووية العالية الطاقة بإفراط، واللازمة لاستكشاف الأطوار النووية وما يترتب عليه من أمور كوزمولوجية (كونياتية) تبقى من الأشياء المأمولة. ولقد قدم كل من مختبر لورنس بيركلي الوطني، ومختبر بروكهيفن الوطني، اقتراحات أولية لمسرعات الأيونات الثقيلة (والحلقات المرتبطة بها والخاصة بتخزين الأيونات) في مجال الـ TeV (تريليون — أي مليون مليون — إلكترون فولط).

وفي الوقت الحاضر تعطي المسرعات المتاحة لمحة عن العلم المتعلق بالتصادمات النسبوية بين النوى. وهو علم هجين يعتمد على معرفتنا لميدانين: فيزياء الجسيمات تحت الذرية العالية الطاقة من جهة، والعلم النووي من جهة أخرى. وقد كان كل منهما — خلال العقود الأخيرة — يسير بمعزل عن الآخر، وبينهما اليوم تفاعل ضعيف. ومع ذلك يمكن لاتصال مُناخين لابد أن يولّد اضطرابات شديدة فحسب، بل خِصباً شديداً أيضاً. إن التحام علمين، فيزياء الجسيمات والعلم النووي، لدراسة التصادمات بين النوى، له إمكانات محتملة مشابهة.



التصادمات بين البروتونات الدوّامة

تعتمد نتيجة التصادم بين بروتونين اعتماداً مدهشاً على اتجاهي سبينيهما (التفافيهما الذاتيين). وتشكل النتائج تحدياً للنظرية السائدة في وصف بنية البروتون وقواه.

(أ.د. كريش)

إن اللاعب الماهر، الذي يتمتع بالمعرفة الحدسية لخواص الكرة البليارديّة، ينجح في تنفيذ قذفات صعبة ولكن يمكن التنبؤ بها، وذلك بضبطه لسرعة الكرة ودورانها. وهكذا أجريت مع زملائي سلسلة من التجارب استخدمنا فيها (معجّلاً) مُسرّعاً للجسيمات وقمنا بتغيير طاقة البروتونات المتصادمة وسبينها. إلا أننا، بخلاف لاعب البليارد، لم نستطع التنبؤ بتأثيرات عملنا لأن هناك كثيراً من خواص البروتون ما تزال غامضة. وفي الواقع لاحظنا سلوكاً غير متوقع، ومذهلاً في أغلب الأحيان، يتحدى النظرية الحالية لبنية البروتون والقوى ــ ألا وهي الديناميكا اللونية الكمومية.

لقد بدأت الدراسة عام 1973 باستخدام جهاز (سنكروترون التدرج الصفري) Zero Gradient Synchrotron (ZGS) في مختبر أرغون الوطني. وهناك قامت مجموعة البحث التي أرأسها في جامعة متشيغان باستطارة حزم من البروتونات المستقطبة، من أهداف كانت البروتونات فيها مستقطبة أيضاً، أي أن سبينها كان في الاتجاه نفسه (انظر: *«The Spin of the proton», by Alan D. Krisch; Scientific American, May 1979»*.

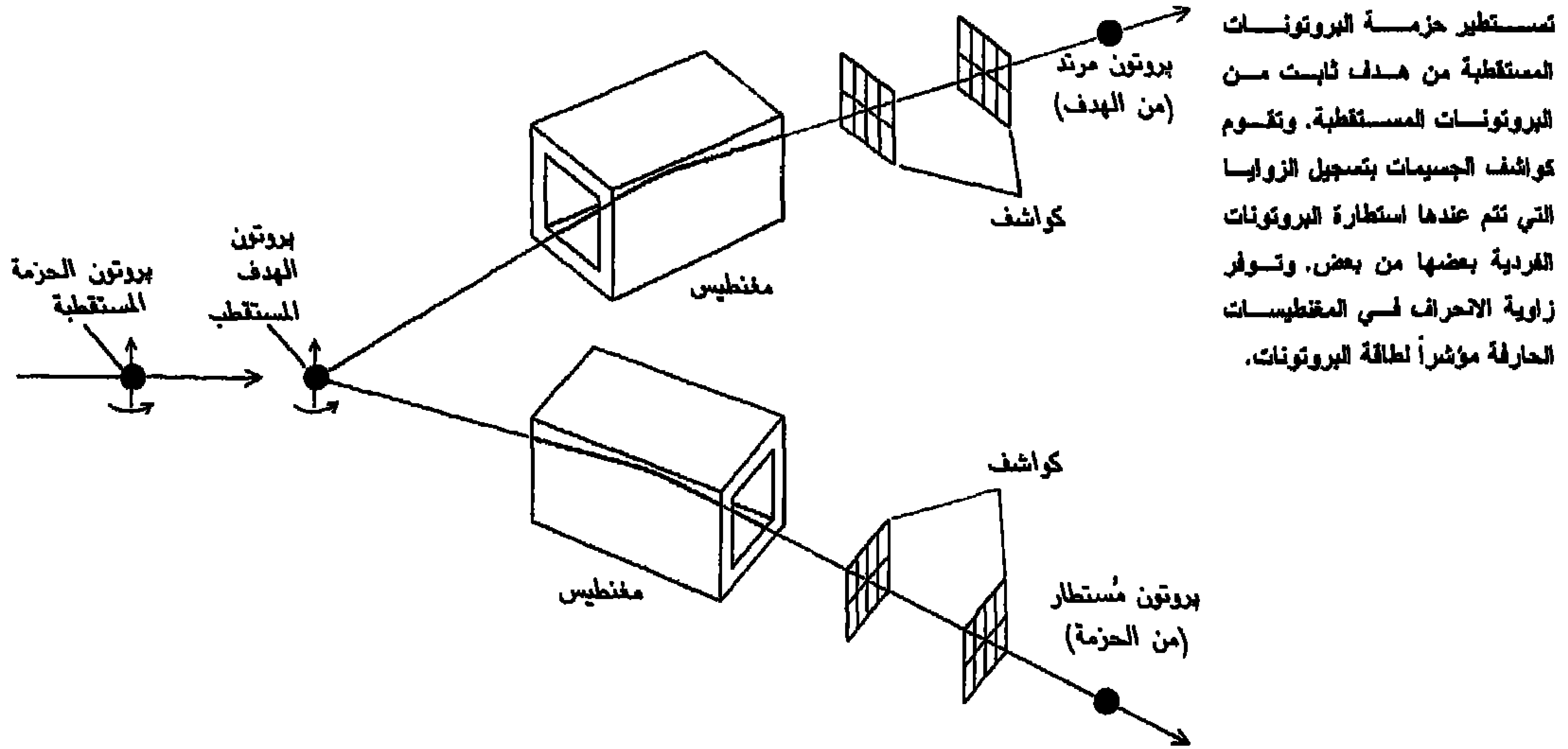
وقد بينت النتائج أن السبين يؤدي دوراً مهماً في التفاعلات العالية الطاقة بين البروتونات: إذ كانت تصادمات البروتون ــ البروتون العنيفة تحدث في الغالب عندما كان استقطاب الحزمة والهدف في الاتجاه نفسه. وعندما تكون سبينات بروتونات الحزمة والهدف في اتجاهين متضادين، يبدو في الغالب أن البروتونات تمر بعضها ببعض دون أن تتفاعل.

وفي جهاز ZGS كنا مقيدين باستخدام طاقات تجريبية تبلغ نحواً من 13 جيكا إلكترون فولت (GeV) أي بليون إلكترون فولت. وبعد ست سنوات من العمل الشاق في مختبر بروكهيفن الوطني، تم فيها إدخال تعديلات على مسرع آخر يسمى (سنكروترون التدرج المتردد) Alternating Gradient Synchrotron (AGS)، أصبح بإمكاننا دراسة آثار سبين البروتون عند طاقات أعلى بكثير: تصل إلى 18.5 GeV عندما يكون الاستقطاب في بروتونات الحزمة والهدف معاً . وإلى 28 GeV عندما يكــون الاســتقطاب في الهــدف فقــط.



يقوم رباعي القطب راديوي التردد في سنكروترون التدرج المتردد AGS في مختبر بروكهيفن الوطني بتعجيل البروتونات. ويتكون رباعي القطب هذا من أربعة أقطاب كهربائية، إثنان منها بشحنة موجبة والآخران بشحنة سالبة، موضوعة بحيث يتقابل القطبان المتماثلان. وفي رباعي القطب هذا، الذي يبلغ طوله خمس أقدام ويبلغ قطره قدماً واحدة، تتذبذب القطبيات بمعدل 200 مليون مرة في كل ثانية. والبروتونات التي تدخله يكون استقطابها قد تم مسبقاً؛ أي أن سبينها يكون في اتجاه واحد. ويحافظ رباعي القطب راديوي التردد على الاستقطاب أثناء تعزيزه لطاقة البروتونات من قيمتها الابتدائية البالغة 20000 إلكترون فولت (20 كيلو إلكترون فولت) إلى 760 كيلو إلكترون فولت.

إن جميع لَبِنات بناء المادة ــ أي البروتونات والنترونات والإلكترونات تبدو مثل الدوامة التي تدور. و(التدويم) Spinning خاصة كمومية جوهرية، إذ إن لكل جسيم كمية محددة من (السبين) Spin، أو الاندفاع الزاوي السبيني، مثلما له كتلة وشحنة كهربائية محددتان. وعندما يتصادم جسيمان دوامان فإن اتجاهي سبينيهما يمكن أن يؤثرا في (استطارتهما «تبعثرهما» Scattering) بالكيفية ذاتها التي يستطيع بها الدوران السريع لكرات البليارد حول محور شاقولي (عمودي) أن يؤثر في ارتداد الكرات بعد التصادم.



تستطير حزمة البروتونات المستقطبة من هدف ثابت من البروتونات المستقطبة. وتقوم كواشف الجسيمات بتسجيل الزوايا التي تتم عندها استطارة البروتونات الفردية بعضها من بعض. وتوفر زاوية الانحراف في المغنطيسات الحارفة مؤشراً لطاقة البروتونات.

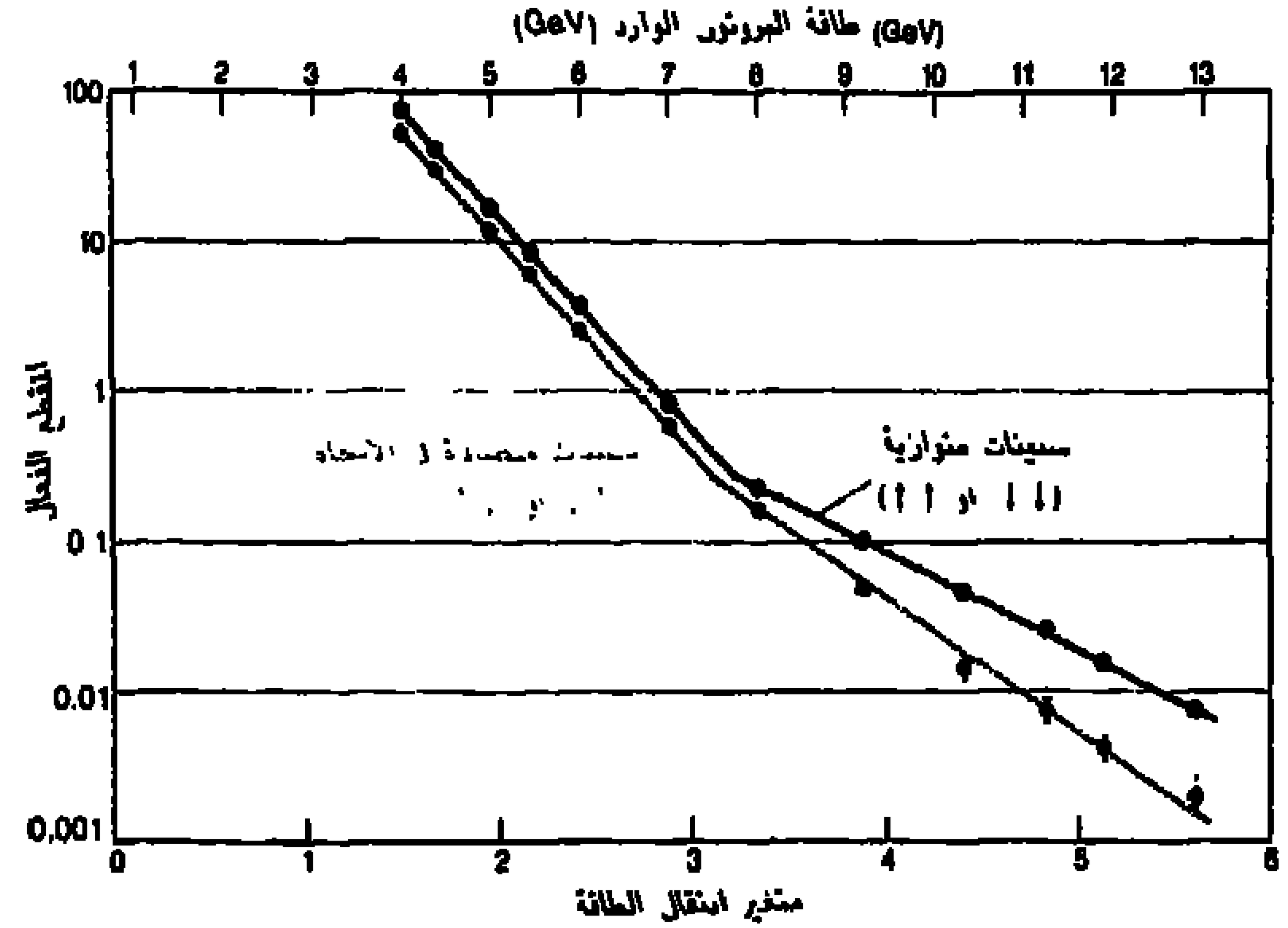
عندئذ تضاعفت المفاجآت، فعندما تزيد طاقة تصادم البروتونات، يبدو أن آثار السبين تكون اهتزازية. وعند أقصى الطاقات التي استخدمناها كانت آثار السبين واضحة بشكل لافت للنظر.

لقد كان تفسير دهشتنا سهلاً من وجهة نظر واحدة. إذ لما كانت الطاقة المرتبطة بسبين البروتون ثابتة، فإن الدور الذي يؤديه السبين يجب أن يقل مع زيادة طاقة التصادم. وعندما تكون الطاقة عالية بدرجة كافية، يجب ألا يكون هناك أي فرق يذكر سواء كانت سبينات البروتونات المتصادمة في الاتجاه نفسه أو في اتجاهين متضادين. ولكن حقيقة كون اتجاهات السبين لها آثار كبيرة توحي أن فهمنا للطريقة التي تتفاعل بها البروتونات بعضها مع بعض مايزال غير مكتمل. بل إن التجارب تشكك في النموذج المقبول حالياً للبنية الداخلية للبروتون الذي يعتبر البروتون مكوناً من ثلاثة مكونات أصغر تسمى (كواركات) Quarks تربطهما معاً القوة النووية الشديدة (وهي القوة التي تصفها الديناميكا اللونية الكمومية).

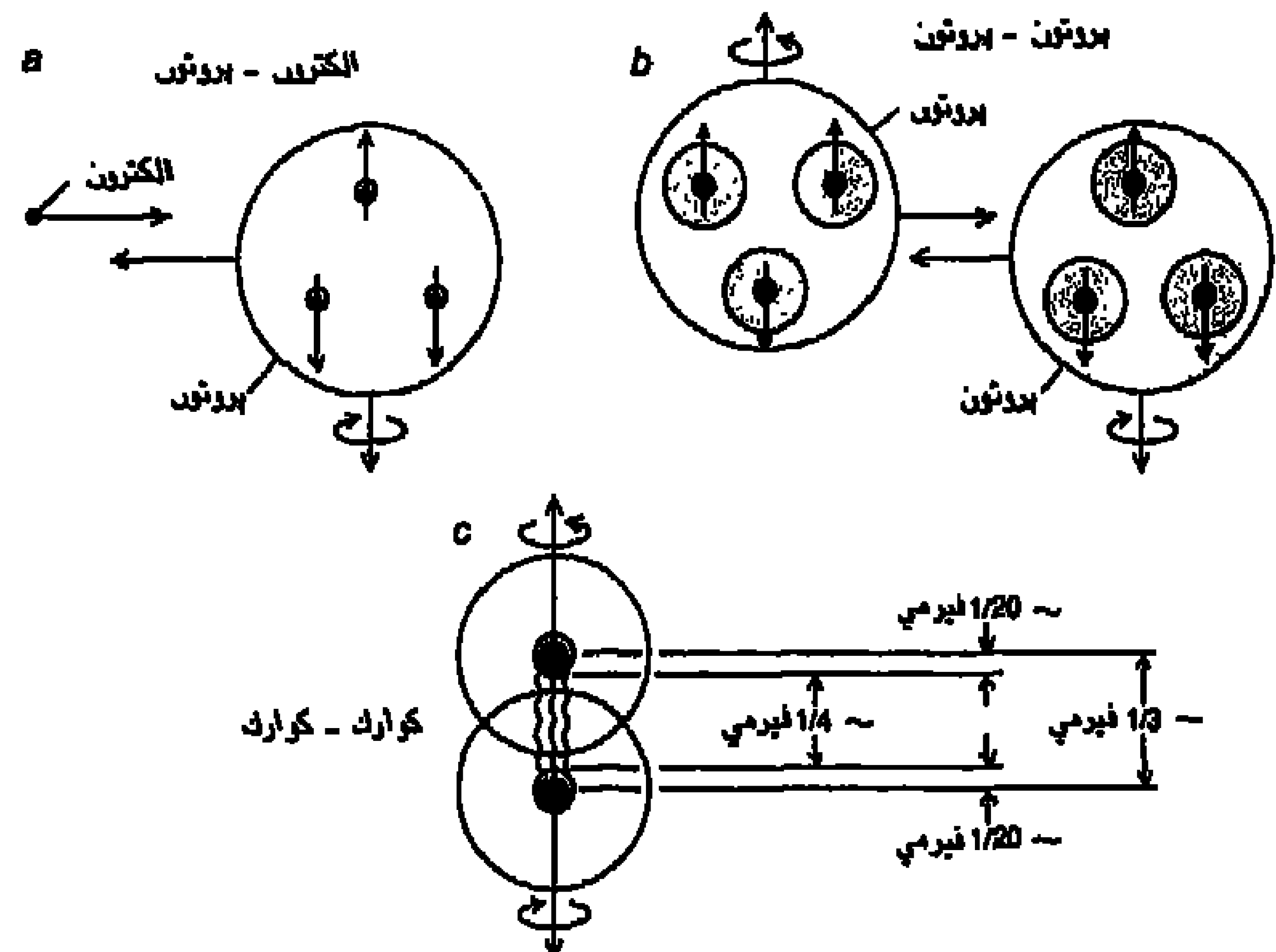
من المؤكد أن نتائجنا الجديدة هذه لم تكن أول نتائج سببت فيها ظاهرة السبين الدهشة والارتباك للفيزيائيين. ففي عام 1925 عندما اقترح (س.إ. كودسميت) Samule A. Goudsmit و(ج.أ. يولنبيك) George E. Uhlenbeck، أول مرة، أن لكل إلكترون خاصية تسمى السبين، أخبرهما (و. باولي) Wolfgang Pauli أن هذا المفهوم تافه. ومع ذلك، أصبح السبين في أواخر العشرينيات والثلاثينيات من القرن الحالي عاملاً مهماً في تطوير ميكانيكا الكم والفيزياء الذرية، وخاصة في أعمال (ب.أ.م. ديراك) P.A.M.Dirac.

وفي الأربعينيات كان علماء الفيزياء النووية يعتقدون أن آثار السبين تظهر فقط في التصادمات الذرية المنخفضة الطاقة، وأنها لا يمكن أبداً أن تكون مهمة في التصادمات النووية عند الطاقات التي تبلغ عدة ملايين إلكترون فولت. بعد ذلك وجد (ش.ل. أوكسلي) Charles L. Oxley وزملاؤه في جامعة روشستر دليلاً على آثار كبيرة للسبين في تصادمات تمت عند عدة مئات ملايين الإلكترون فولت. إن الدهشة والإثارة اللتين نجمتا عن هذه النتيجة تم تدوينهما في مقالة ألّفها (إ. فيرمي) Enrico Fermi عام 1954.

لقد كان معظم فيزيائيي الطاقة العالية مقتنعين بأن السبين غير مهم في تصادمات الجسيمات الأولية عند طاقة تبلغ بلايين الإلكترون فولت. إن هذه القناعة بقيت سنين عديدة تخضع للاختبار من خلال سلسلة من التجارب الصعبة فقط، كان من ضمن الذين قاموا بها (أ. تشيمبرلين) Owen Chamberlain و(إ. سيكري) Emilio Segré بجامعة كاليفورنيا في بيركلي. بعد ذلك وفي أواخر الخمسينيات، اقترح (أ. أبركام) Anatole Abragam من (الكلية الفرنسية) Collège de France و(ك.د. جيفريز) Carson D. Jeffries من بيركلي، بناء أهداف من البروتونات المستقطبة. إن التقنية، التي كانت ناجحة جداً، تعتمد على درجة حرارة منخفضة وحقل مغنطيسي شديد لاستقطاب سبينات إلكترونات معينة في كريات مجمدة من مادة الهدف، ومن ثم يضطر الحقل المغنطيسي سبينات هذه الإلكترونات إلى التراصف. عندئذ يسلط إشعاع من موجات دقيقة لينقل تراصف سبينات الإلكترونات إلى البروتونات المجاورة ويجعل سبيناتها في اتجاه واحد. إن التجارب التي أجريت في الستينيات وأوائل السبعينيات في بيركلي و«سيرن» (المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات) و«أرغون» باستخدام أهداف من البروتونات المستقطبة كشفت آثاراً صغيرة، لكنها مثيرة، للسبين في تصادمات الطاقة العالية. ومع ذلك، ظل معظم فيزيائيي الطاقة العالية يعتقدون أن السبين غير مهم جداً، وأن ما له من أهمية سيقل أكثر عند الطاقات العالية.



يؤثر السبين في استطارة البروتون عند الطاقة العالية. وفي الشكل رُسم المقطع الفعال عند الزاوية 90 درجة ـ أي احتمال الاستطارة عند هذه الزاوية ـ مع متغير انتقال الطاقة للتصادمات. (عند زاوية استطارة ثابتة يتناسب متغير انتقال الطاقة مع طاقة البروتون الوارد). والرسم المبين هو لمجموعتين من المعلومات. في المجموعة الأولى كان سبين البروتون الوارد موازياً لسبين بروتون الهدف، وفي الثانية كانت السبينات متضادة في الاتجاه. وعند الطاقات الدنيا تكون المقاطع الفعالة المتوازية مماثلة لتلك المتضادة في الاتجاه، وهو ما تنبأت به النظرية السائدة لبنية البروتون وخواصه ـ أي الديناميكا اللونية الكمومية. ولكن عند الطاقات الأعلى تتباين المقاطع الفعالة بشكل لافت للنظر، ولا يعرف سبب لهذا التباين حتى الآن.



تبعاً للنموذج النظري للبروتون في الديناميكا اللونية الكمومية فإن الجسيم يتكون من ثلاثة مكونات تسمى الكواركات يرتبط بعضها ببعض بالقوة الشديدة. وباستطارة الإلكترونات شبه النقطية، من البروتونات الساكنة، وذلك في «مركز المعجل الخطي في ستانفورد» (a)، حصلت مجموعة من الباحثين من معهد ماساتشوستس للتقانة ومركز المعجل الخطي في ستانفورد على معلومات تفيد أن لمكونات البروتون نصف قطر يقل عن (1/20) فيرمي. (الفيرمي يساوي 10^{-15} متر ـ أي ما يعادل نصف قطر البروتون تقريباً). وتشير المعلومات التي حصل عليها المؤلف من تجربته التي تمت فيها استطارة البروتونات من البروتونات (b)، إلى أن للمكونات نصف قطر يساوي (1/3) فيرمي تقريباً. إن هاتين النتيجتين معاً توحيان بنموذج مثير قد يكون هو النموذج الصحيح لمكونات البروتون (c). وتبين معلومات «مركز المعجل الخطي في ستانفورد» الشحنة الكهربائية لمكونات البروتون وربما يكون لكل واحد من المكونات قلب نصف قطره يساوي (1/20) فيرمي تقريباً وحقل قوة شديد يمتد (1/4) فيرمي آخر. وعندما يتصادم كواركان فإن المدى الفعال يكون نحو (1/3) فيرمي فقط.

وفي عام 1973 بدأت مجموعة البحث التي أرأسها باستخدام طريقة مختلفة في جهاز ZGS قمنا فيها باستقطاب الحزمة والهدف. وقد حافظنا على استقطاب الهدف باستخدام مغنطيس خاص يولد حقلاً شديداً (25000 غاوس) وأبقينا درجة حرارة الهدف عند نصف درجة فوق الصفر المطلق باستخدام مزيج من سائل الهيليوم -3 والهيليوم -4. وفي الوقت نفسه استخدمنا نظاماً معقداً من المغنطيسات كي تبقى حزمة البروتونات مستقطبة أثناء تعجيلها. وباستطارة بروتونات الحزمة المستقطبة، من بروتون الهدف المستقطبة، تمكنا من إجراء أول قياسات للتصادمات المرنة بين البروتونات التي تكون سبيناتها في اتجاهات معلومة. ويحدث التصادم المرن عندما تنتقل كل طاقة البروتون الوارد، إلى البروتونين المرتدين. أما في التصادم غير المرن فإن بعض الطاقة يستخدم في إنتاج جسيمات جديدة. وقد حصرنا دراستنا في التصادمات المرنة لأنها تبدو بسيطة وأساسية.

لقد قمنا بدراسة استطارة البروتونات في أربع حالات ابتدائية للسبين. في الحالة الابتدائية الأولى كانت سبينات بروتونات الحزمة وبروتونات الهدف على السواء تتجه إلى أعلى (أي أنه عند تدوير أصابع اليد اليمنى في اتجاه الدوران تشير الإبهام إلى أعلى) وسأسمي هذه الحالة: أعلى ــ أعلى، بمعنى أن كلمة «أعلى» الأولى تشير إلى اتجاه سبين بروتونات الحزمة، في حين تشير كلمة «أعلى» الثانية إلى اتجاه سبين بروتونات الهدف. ووفقاً لهذه القاعدة تكون الحالات الابتدائية الباقية هي: أسفل ــ أسفل، أعلى ــ أسفل، أسفل ــ أعلى. كما أن اتجاه سبين بروتونات الحزمة كان يُعكس كل ثلاث ثوان تقريباً، على حين كان يُعكس اتجاه سبين بروتونات الهدف كل بضع ساعات تقريباً.

ولكي يتم الاستكشاف إلى أقصى عمق ممكن داخل البروتون جعلنا التصادمات تتم بأشد عنف ممكن. وكنا نأمل أن نجد بعض الدلائل الجديدة الخاصة بطبيعة المكونات الدقيقة، التي تبدو قادرة على الوجود داخل البروتون دون المقدرة على الخروج، وهي المكونات التي يسميها النظريون الكواركات. إن نظرية الكوارك التي طورها (م. كيل مان) Murry Gell-Mann من معهد كاليفورنيا للتقانة أثبتت نجاحاً حقيقياً في تفسير كتل الجسيمات القصيرة العمر العديدة التي تتولد عندما تتصادم البروتونات. ومن جهة أخرى فإن النظرية الكواركية لاستطارة البروتونات ــ أي الديناميكا اللونية الكمومية ــ لم تقدم سوى القليل من التنبؤات التي تم تحقيقها. إن الديناميكا اللونية الكمومية نظرية مرنة جداً، وأمكن تعديلها بسهولة لتتفق مع معظم مُعطيات الاستطارة الجديدة. ولما كنت عالماً يميل إلى التشدد في التزام الشكليات، فإنني أجد في التعديل إثارة أقل مما أجده في القدرة على التنبؤ.

إنني أعترف بوجود بعض التشويش فيما يتعلق بالرأي القائل بأن الكواركات تستطيع أن تعيش كجسيمات داخل البروتون وليس

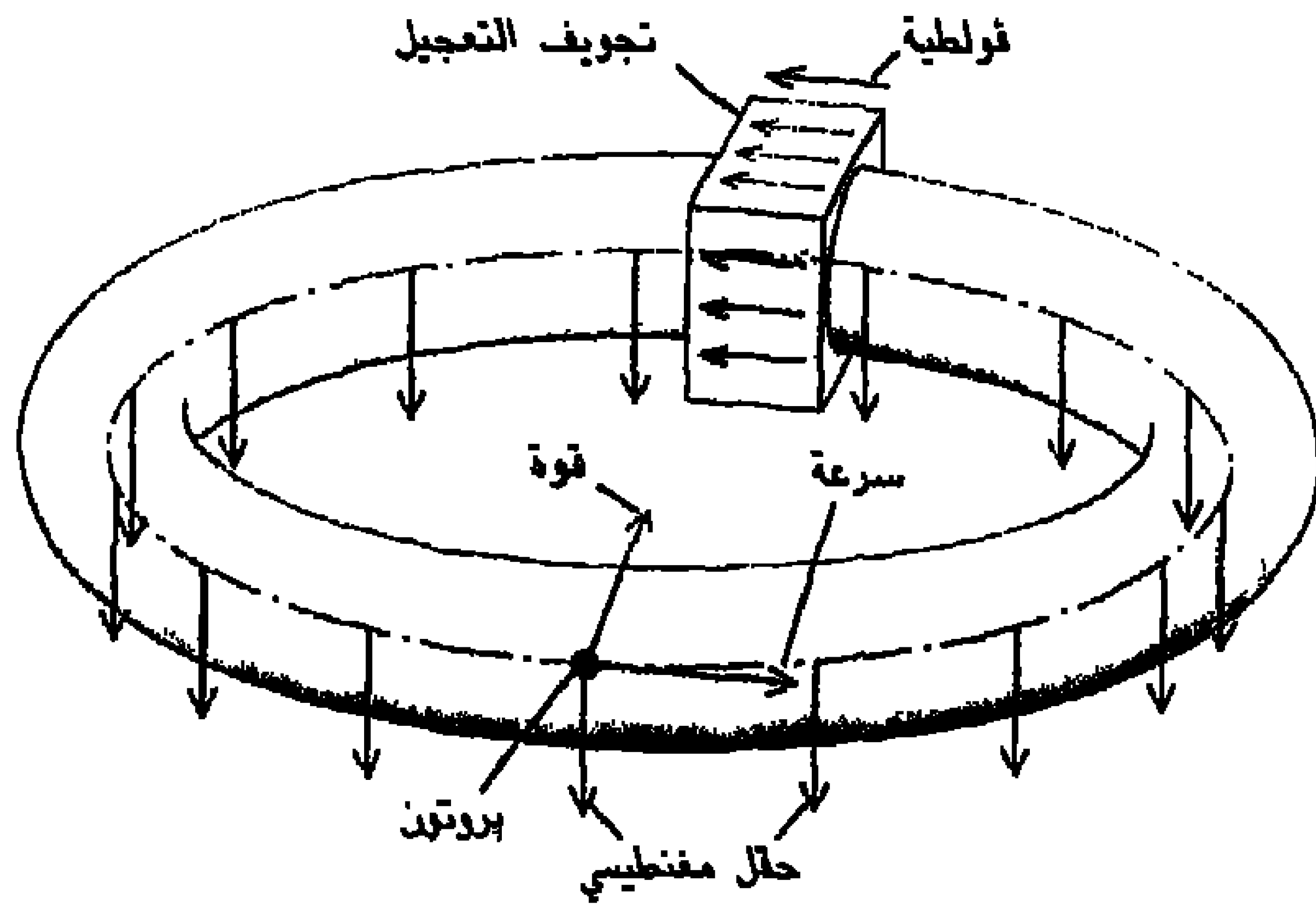
خارجه. والأفكار الذكية الجذابة في الديناميكا اللونية الكمومية، التي اقترحت لتفسر انحباس الكواركات الظاهرة، قد تثبت صلاحيتها. كما أنني ربما أغير وجهة نظري في النهاية، وهي أن الجسيمات يجب أن تكون أشياء محددة تماماً. ومع ذلك، فإنني أعتقد أنه يجب عدم التخلي عن المفهوم البسيط لمصلحة مفهوم آخر أكثر تعقيداً حتى تتوفر البيّنات التجريبية بشكل لا يدع مجالاً للشك.

إن أفضل التصادمات التي تسبر إلى أقصى عمق ممكن قوى السبين لمكوّنات البروتون، هي تلك التي يتم فيها تصادم بروتونين بحيث يرتدان بزاوية قائمة على اتجاه الحركة الابتدائي. ومثل هذه التصادمات تنقل أكبر نسبة من طاقة البروتون الوارد وتكون، من ثم، أعنف التصادمات. وفي تجربتنا النهائية في جهاز ZGS قمنا بدراسة لمثل هذه التصادمات المتعامدة عند تغيير طاقة البروتون الوارد ما بين 4 و13 GeV، ومراقبة ما يحدث عند كل طاقة عندما تكون سبينات البروتونات في الاتجاه ذاته، وكذلك عندما تكون في اتجاهين متضادين.

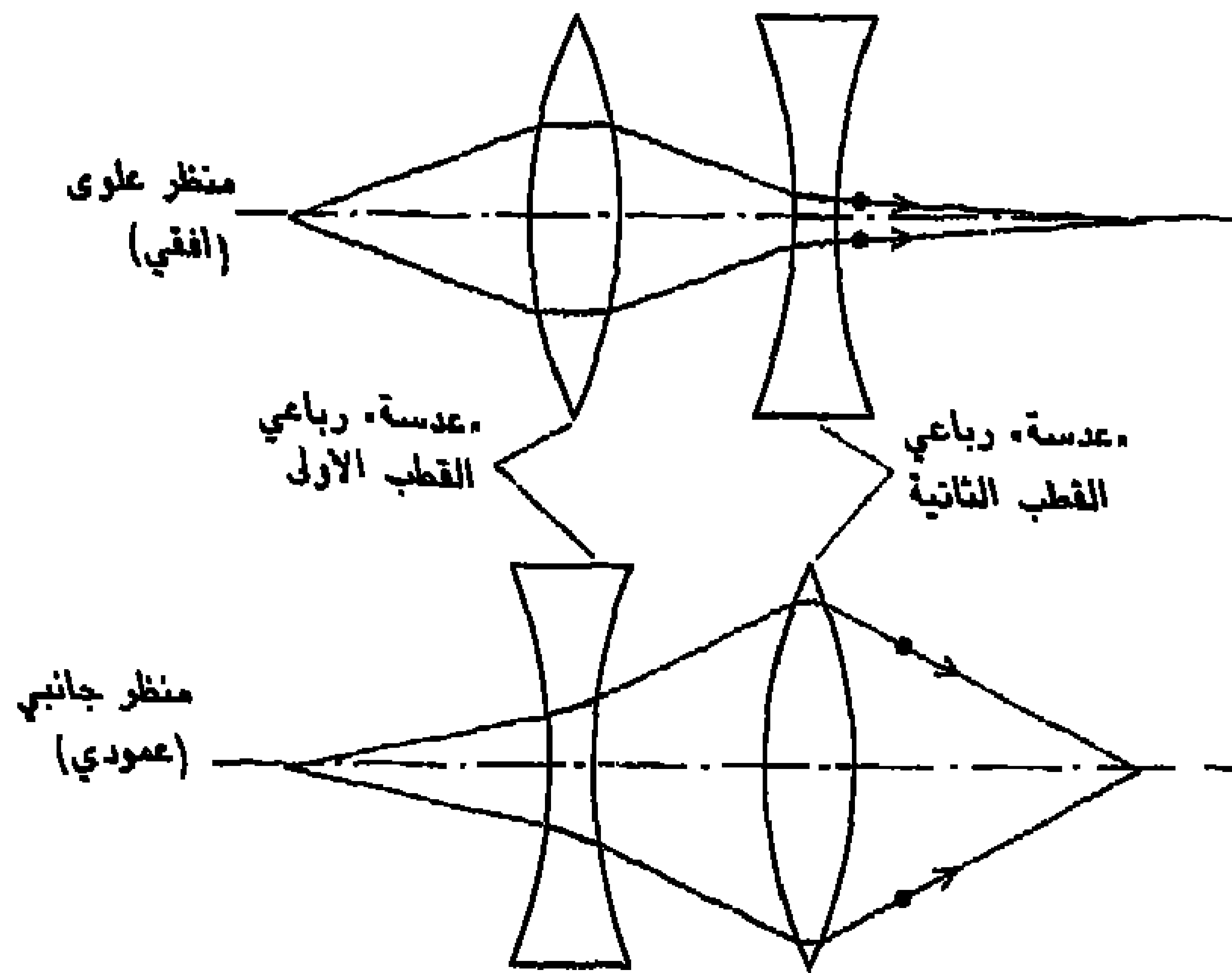
وعلى وجه الخصوص، قمنا بقياس احتمال حدوث التصادم المرن المتعامد تماماً، على نحو منفصل: للبروتونات ذات السبينات المتوازية (أعلى ــ أعلى أو أسفل ــ أسفل) والبوتونات ذات السبينات المتعاكسة في الاتجاه (أعلى ــ أسفل أو أسفل ــ أعلى). ويسمى احتمال التصادم هذا، المقطع الفعال للاستطارة المرنة لتصادم البروتونات بزاوية 90 درجة. ويمكن اعتبار المقطع الفعال ممثلاً للقدر الفعال للبروتونات المتفاعلة، وهو يبين في الرسم البياني النموذجي بدلالة طاقة البروتون الوارد.

وقد بينت تجربتنا مؤشرين مهمين إلى مكونات البروتون. ويجيء المؤشر الأول من كون المقطع الفعال ينخفض بسرعة مع زيادة طاقة التصادم إلى 8 GeV، ولكن الانخفاض يجري تدريجياً فقط، عندما تزيد الطاقة عن 8 GeV. ويمكن الحصول من المعطيات على معلومات عن بنية البروتون باستخدام طريقة رياضياتية تسمى تحليل (فورييه) Fourier. إن الانخفاض الابتدائي السريع في المقطع الفعال يعني أنه عند الطاقات المنخفضة (تنشطف) Glance البروتونات بعضها على بعض فقط، ويبدو كما لو أن طبقة البروتون الخارجية لينة نسبياً وكبيرة ــ يبلغ نصف قطرها نحو 1 فيرمي، أو 10^{-15} متر. ويوحي الانخفاض التدريجي اللاحق في المقطع الفعال أن تصادمات الطاقة العالية تتعلق بأشياء صلبة موجودة داخل البروتون ذات أنصاف أقطار تبلغ، على ما يبدو، قُرابة ثلث فيرمي، وهذا يشكل دليلاً ينسجم مع النموذج ثلاثي الكواركات في الديناميكا اللونية الكمومية.

ومن جهة أخرى، فالمؤشر الثاني عن مكونات البروتون لا ينسجم مع الديناميكا اللونية الكمومية. ويجيء من ملاحظة أنه عند الطاقات التي تزيد عن 8 GeV، يكون الانخفاض في المقطع الفعال أسرع، عندما تكون سبينات البروتونات متعاكسة، منه عندما



يستخدم السنكروترون الحقلين الكهربائي والمغنطيسي معاً من أجل تعجيل البروتونات (التي تحمل شحنة كهربائية) إلى طاقات تصل إلى بلايين كثيرة من الإلكترون فولت. تُضطر البروتونات إلى الحركة في حزمة دائرية حول حجرة (مخلاة) مفرغة بشكل الكعكة، وذلك بتأثير مجال مغنطيسي متعامد مع سطح الحلقة. وفي كل مرة يدور فيها البروتون حول الكعكة يتعرض إلى فولطية معززة داخل تجويف التعجيل تبلغ نحو 100 كيلو إلكترون فولت.



نتيجة للتبئير القوي تنحصر البروتونات المتحركة داخل السنكروترون في كعكة صغيرة المقطع، مما يقلل من حجم المغنطيسات اللازمة لحني حزمة البروتونات. ويتحقق ذلك بوضع اثنين من رباعيات القطب المتضادة في صف. ويقوم رباعي القطب الأول بتبئير الحزمة أفقياً ولكنه يجعلها تتفرج عمودياً، كما يقوم رباعي القطب الثاني بتبئير الحزمة عمودياً (شاقولياً)، ولكنه يجعلها تتفرج أفقياً. وبتعديل شدة رباعي القالب يستطيع المرء تبئير الحزمة في كلا الاتجاهين.

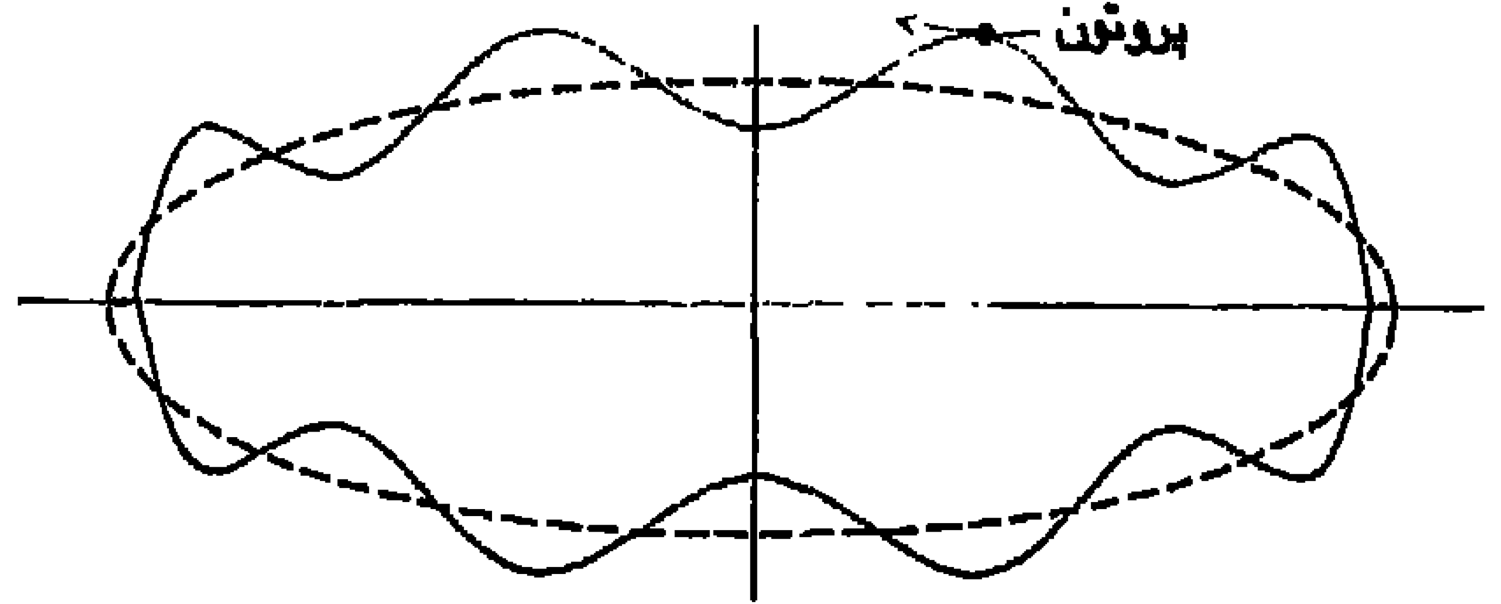
تكون متوازية. وبعبارة أخرى، تتوفر للبروتونات، بشكل ما، فرصة أفضل للتصادمات العنيفة عندما تكون سبيناتها متوازية. وعند 13 GeV يكون المقطع الفعال (احتمال التصادم) أكبر بأربع مرات، عندما تكون السبينات متوازية، منه عندما تكون متضادة في الاتجاه. وعلى الرغم من أننا لا نعرف بشكل جازم سبب هذا السلوك الغريب وغير المتوقع أبداً، فإنه ليس بالخبر السار للديناميكا اللونية الكمومية.

الديناميكا اللونية الكمومية بفرق يساوي الضعف بين المقاطع الفعالة في حالتي السبينات المتوازية والسبينات المتضادة، فإن الفرق الذي يبلغ أربعة أضعاف لا يمكن التوفيق بينه وبين النظرية بسهولة.

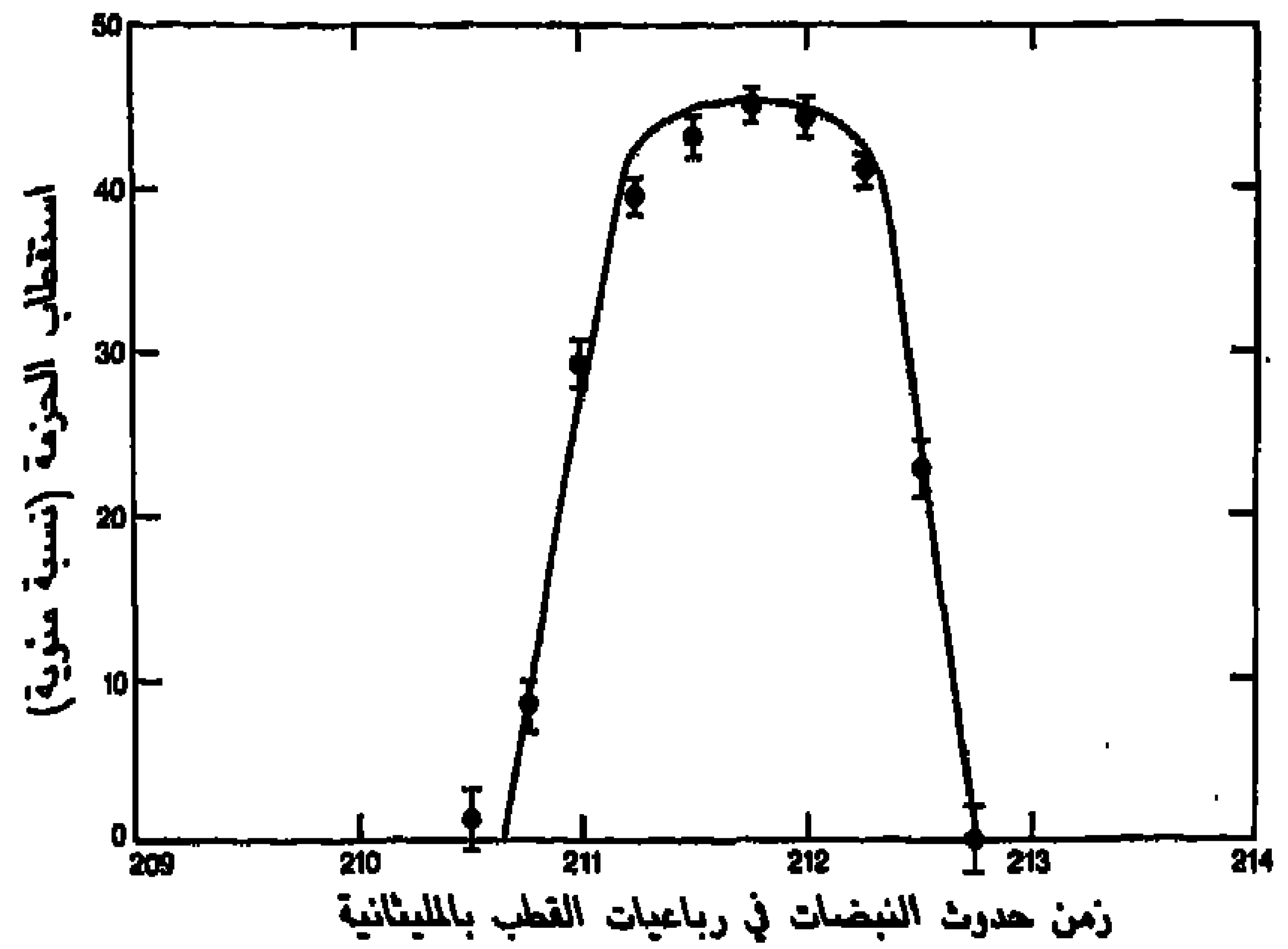
ماذا تعني النسبة التي تساوي أربعة؟ هل تعني أن الديناميكا اللونية الكمومية لا تصلح إلا في تصادمات أكثر طاقة وأشد عنفاً من تلك التي درسناها؟ ولسوء الحظ فإن علماء الفيزياء النظرية مختلفون في تحديد مدى صلاحية الديناميكا اللونية الكمومية. ونظراً لأن النسبة تبدو آخذة في الزيادة كلما صارت التصادمات أكثر طاقة وأشد عنفاً، فإن معطياتنا لا تدعم بالتأكيد الديناميكا اللونية الكمومية. وتعليل ذلك هو أن المكونات «المشاهدة» في تجارب الاستطارة، على الرغم من ارتباطها بطريقة ما بالكواركات التي تفسر كتل الجسيمات، فإنها ليست هي بالضبط الكواركات الدوامة التي تتحدث عنها الديناميكا اللونية الكمومية. وربما يكون كل بروتون محتوياً على عدد آخر من المكونات. والتعليل البديل هو أنه ربما تكون هناك ثلاثة مكونات ولكنها لا تشكل كواركات مستقلة عندما يتصادم بروتونان.

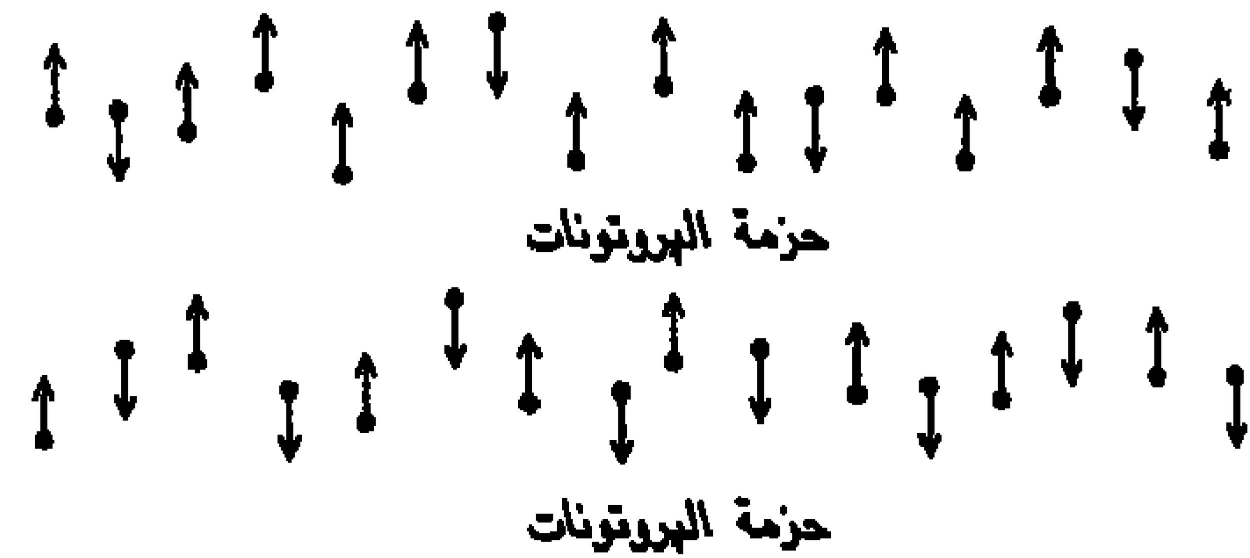
وفي تجاربنا التي كانت الاستطارة فيها تتم بزاوية قدرها 90 درجة، استخدمنا الحد الأقصى للطاقة (في جهاز ZGS) الذي يبلغ 13 GeV. إن إجراء تجارب السبين عند تصادمات أشد عنفاً يتطلب استخدام حزمة من البروتونات المستقطبة تكون أعلى طاقة. وفي أواخر السبعينيات تألفت مجموعة تضم ثمانين من العلماء والمهندسين والفنيين والطلاب من أرغون، وبروكهيفن، وجامعة متشيغان، وجامعة رايس وجامعة ييل وبدأت هذه المجموعة إجراء تعديلات على جهاز AGS في بروكهيفن بحيث يكون من الممكن تعجيل البروتونات الدوامة إلى طاقات تبلغ 20 GeV تقريباً. وقد كانت هذه المهمة من التحدي على درجة كبيرة. ذلك لأن البروتونات الدوامة تدور مراراً في جهاز AGS، وتقطع خلال مدة التعجيل البالغة نصف ثانية مسافة تبلغ 100000 ميل، داخل حقول مغنطيسية شديدة تستطيع بسهولة تخريب استقطابها وجعل سبيناتها جميعاً في اتجاهات مختلفة. ولما كانت الحقول المغنطيسية في جهاز AGS أشد بكثير من تلك التي تستخدم في جهاز ZGS فإنها تمثل مشكلة أكبر. وفي الواقع، قررت إحدى حلقات الخبرة التي نظمتها هيئة الطاقة الأمريكية، والتي كنت أحد أعضائها، في عام 1974 أن «الأسباب الفنية قد تقف حجر عثرة أمام تعجيل البروتونات المستقطبة في المعجلات» (من نوع جهاز AGS).

ولقد نجحنا في النهاية في التغلب على مشكلة نزع الاستقطاب، ولكنها كانت عائقاً مثبطاً للهمم. فمن أجل الوصول إلى الطاقة القصوى التي استخدمناها والبالغة 22 GeV، كان علينا أن نواجه مشكلات نزع الاستقطاب، المعروفة بالرنينات مانعة الاستقطاب، التي تحدث عند 45 طاقة مختلفة أثناء دورة التعجيل. إن القيادة في



الذبذبات البيتاترونية العمودية في حزمة البروتونات هي حركات موجية عمودية تنتج من التبئير العمودي لرباعيات القطب الموضوعة حول السنكروترون. تقود الحركات الموجية البروتونات بعيداً عن جدران حجرة الخلاء أثناء دورانها حول الحلقة. ونظراً لأن الذبذبات تحمل البروتونات عبر حقول مغنطيسية أفقية، فإنها تستطيع تخريب استقطاب حزمة البروتونات، وهذا ما يجعل سبينات البروتونات تتوجه عشوائياً.





حزمة البروتونات

تتم المحافظة على استقطاب البروتونات في جهاز AGS بتشغيل مغنطيسات رباعية القطب نابضة خاصة، في الأوقات المحددة تماماً خلال دورة التعجيل. وقد حقق الباحثون استقطابات قاربت 50% (أعلى الرسم)، وهذا يعني أن 75% من البروتونات كانت دوامة في اتجاه واحد و25% كانت دوامة في الاتجاه المضاد. (الرسم الأوسط). وبدون التوقيت السليم لرباعيات القطب النابضة انخفضت النسبة المئوية للاستقطاب إلى الصفر، أي أن عددين متساويين من البروتونات كانا يدومان في اتجاهين متضادين (أسفل الرسم).

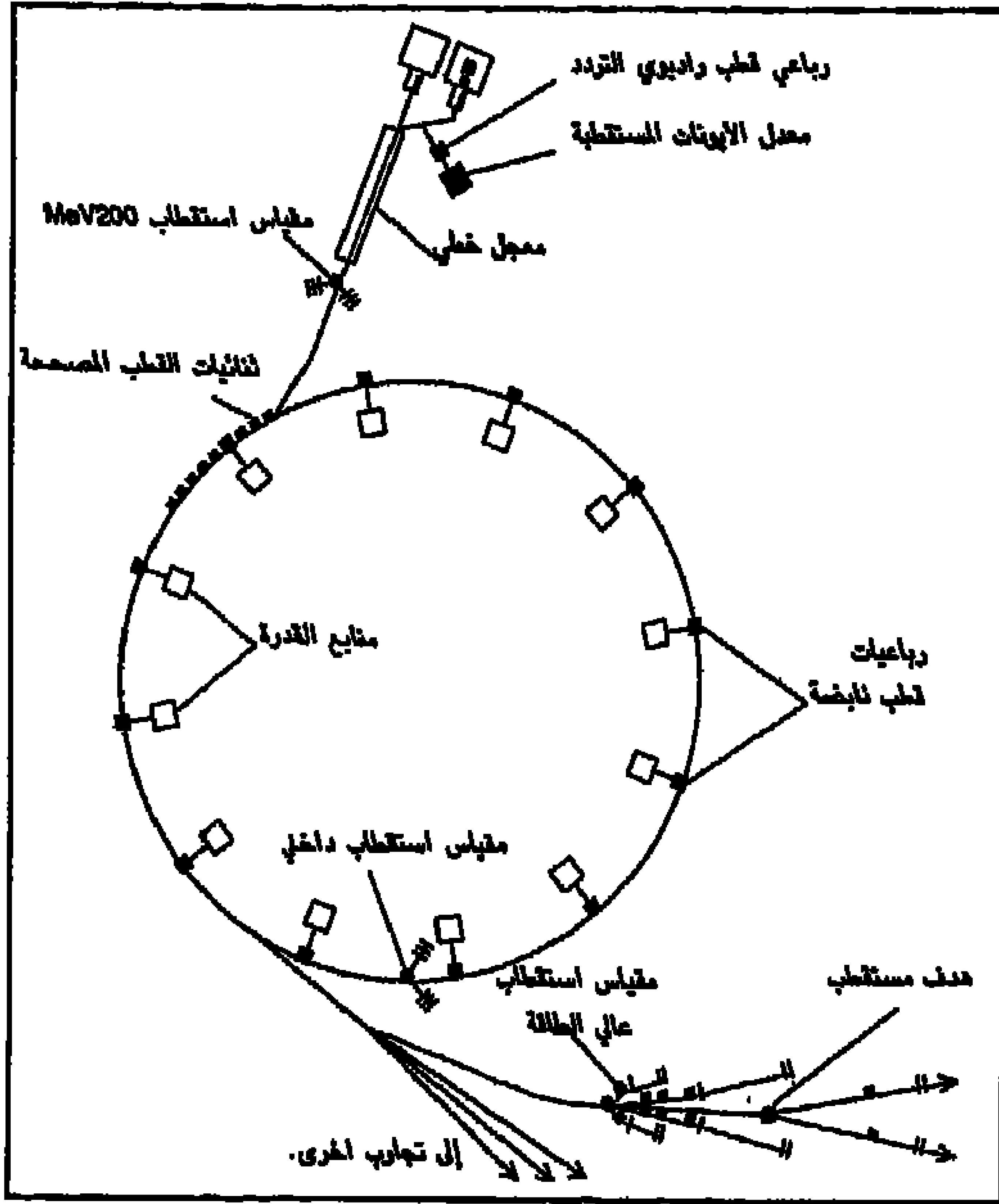
وتبعاً للديناميكا اللونية الكمومية فإن تدويم اثنين من الكواركات الثلاثة في كل بروتون دوّام يجب أن يكون في اتجاه البروتون ذاته، أما تدويم الكوارك الثالث فيجب أن يكون في الاتجاه المضاد. وعلى ذلك، وبغض النظر عما إذا كان سبينا البروتونين المتصادمين متوازيين أو متضادين في الاتجاه، فإن التصادمات تقتضي دائماً وجود بعض الأزواج الكواركية ذات السبينات المتوازية، وبعض الأزواج ذات السبينات المتضادة. وفي الوقت الذي تسمح فيه

بحر الرنينات مانعة الاستقطاب تشكل مجهوداً جباراً يتطلب أجهزة معقدة، تسمى مقاييس الاستقطاب، لتبين النسبة المئوية للبروتونات الدوامة في كل اتجاه. وهذه النسبة المئوية مكنتنا من معرفة ما إذا كنا نسلك الطريق الصحيح عندما كنا نقوم بتعديل بعض المغنطيسات التي صممت بطريقة خاصة. إن «طاقم قيادة الرنين»، الذي كان بقيادة المؤلف و(ل.ج. راتنر) Lazarus G. Ratner من بروكهيفن، كان عليه أن يعمل على مدار اليوم مدة ستة أسابيع ليتغلب على كل الرنينات مانعة الاستقطاب التي كان عددها خمسة وأربعين. وفي يناير/كانون الثاني 1986، بعد أن كرسنا ست سنوات من العمل المكثف في إجراء التعديلات الشاملة، قمنا بتعجيل حزمة مستقطبة إلى طاقة بلغت 18.5 GeV، وهو رقم قياسي عالمي جديد. وعلى الفور بدأت التجارب تستخدم هذه المنشأة الفريدة، وبعد أسابيع قليلة وصلنا بالطاقة إلى 22 GeV.

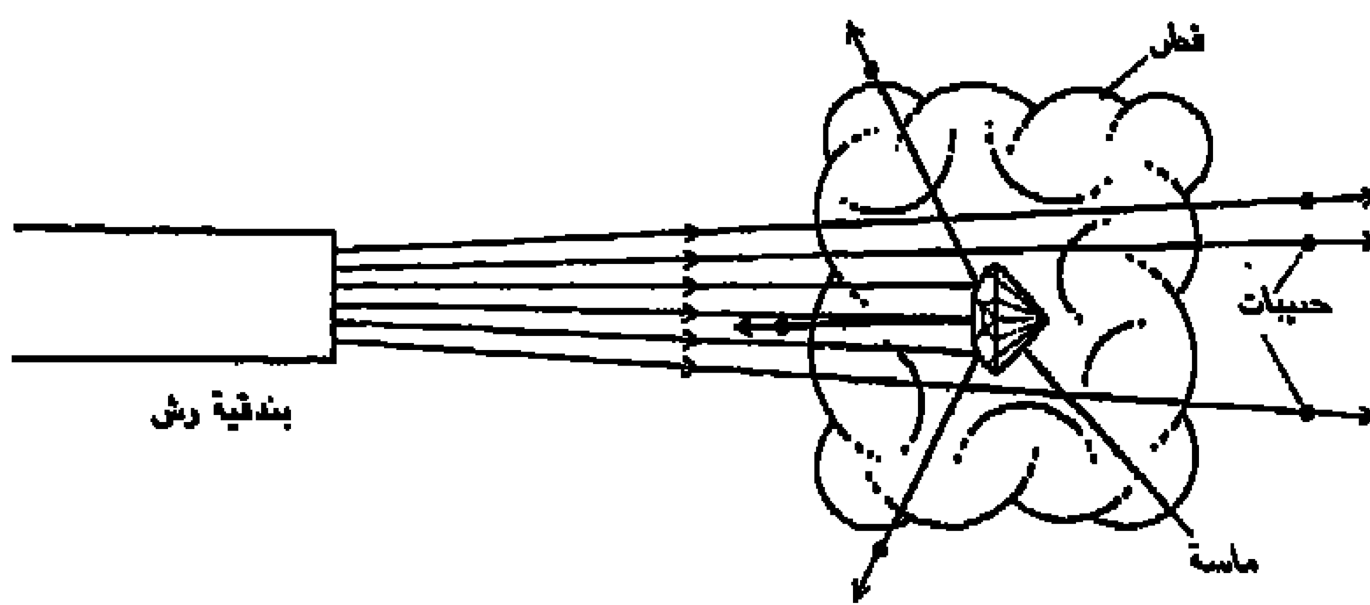
ولكي أشرح سبب نشوء منع الاستقطاب في السنكروترون وكيفية التغلب عليه، لابد لي من وصف طريقة عمل السنكروترون. إن السنكروترون، مثل ابن عمه الأصغر السيكلروترون، يعتمد على الحقلين الكهربائي والمغنطيسي معاً في تعجيل البروتونات (موجبة الشحنة) إلى طاقات عالية. فتضطر البروتونات إلى الحركة في دائرة حول حلقة بشكل الكعكة وذلك بتأثير حقل مغنطيسي يتعامد مع مستوى الحلقة، ويشكل هذا الحقل الشاقولي (العمودي) مسبب الانحناء مصدراً قوياً لمنع الاستقطاب: فإذا كان محور سبين البروتون أفقياً، يستطيع الحقل أن يجعل هذا المحور يدور عدداً كثيراً من المرات أثناء كل رحلة حول الحلقة، مما يجعل من المستحيل تقريباً المحافظة على جميع محاور السبينات متراصفة إلى الأعلى في حزمة البروتونات.

يُعرض البروتون في كل مرة يدور فيها حول الكعكة إلى جهد تعزيز يبلغ 100000 فولت تقريباً فيما يسمى بتجويف التعجيل. وأثناء الشوط الواحد في جهاز AGS يدور كل بروتون 200000 مرة تقريباً حول محيط الكعكة البالغ نصف ميل، وذلك يكسبه في نهاية الشوط طاقة كلية تبلغ 20 GeV. وتستغرق كل دورة حول حلقة هذا السنكروترون 0.0000025 ثانية (2.5 ميكروثانية) وعلى ذلك فإن شوط التعجيل الكامل يستغرق نحو نصف ثانية.

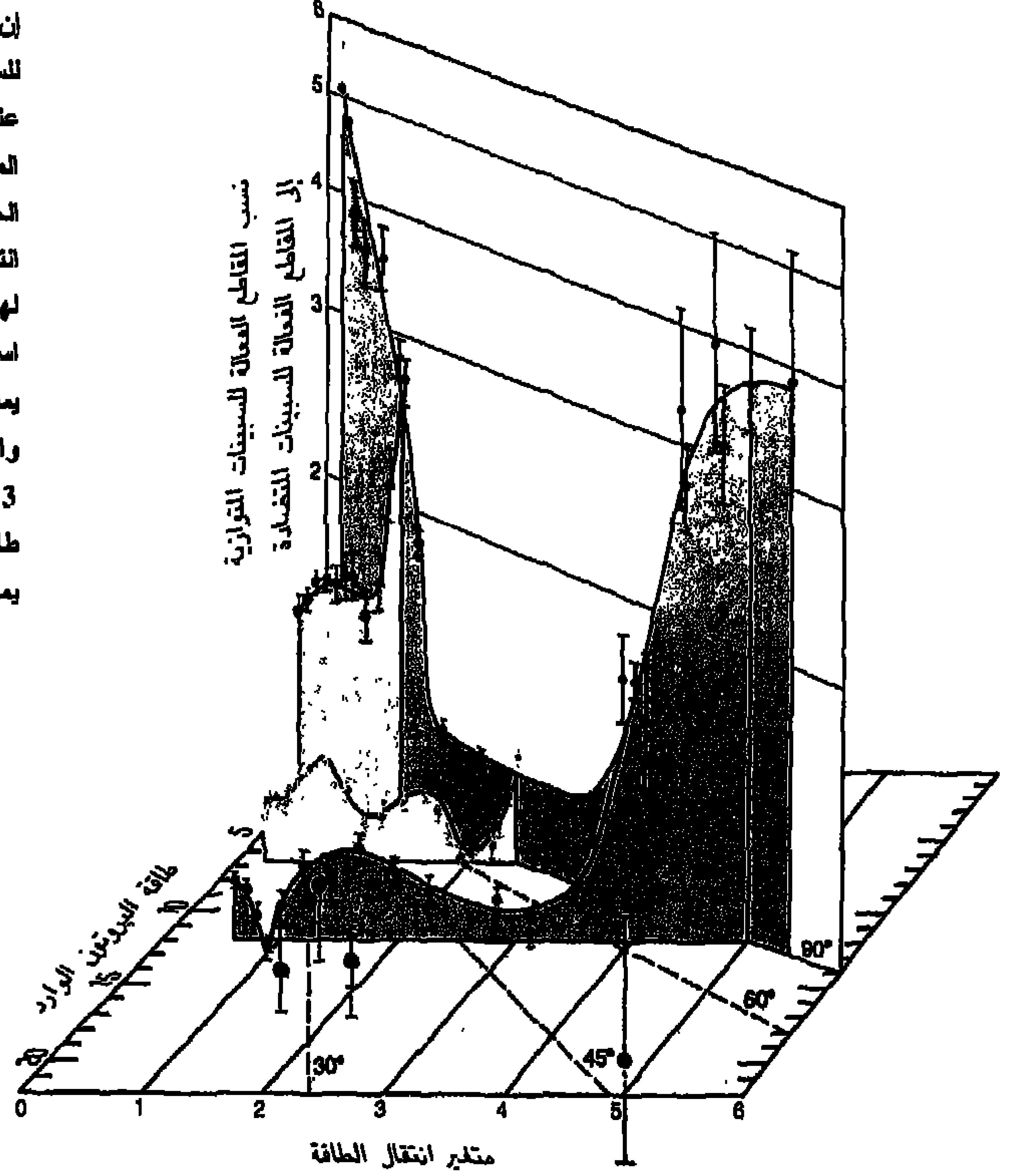
ومن الصعب إبقاء البروتونات محصورة داخل الكعكة طوال زمن شوط التعجيل، نظراً لأن كل جسيم يقطع مسافة تبلغ 100000 ميل داخل أنبوب قطره ثلاث بوصات فقط. وحتى أمهر الرماة فإنه يجد صعوبة في إصابة بقعة قطرها ثلاثة بوصات على بُعد 100000 ميل. أما الفيزيائيون، وهم في الغالب متهمون بقلة التبصر فإنهم يستخدمون حقولاً مغنطيسية خاصة لتبئير البروتونات في بؤرة ومنعها من الإفلات. والحقول المغنطيسية تركز (تُبَئِّر) الجسيمات المشحونة في بؤرة مثلما تركز العدسة المكبرة أشعة الضوء في البؤرة.



يقوم «سنكروترون التدرج المتردد» AGS بتعجيل البروتونات المستقطبة إلى طاقة قدرها 22 بليون إلكترون فولت (GeV): يقوم مصدر الأيونات المستقطبة بحث معظم البروتونات على التدويم في اتجاه واحد. ويقوم رباعي القطب راديوي التردد. بتعزيز طاقة البروتونات إلى 760 كيلو إلكترون فولت (KeV) قبل أن يغذى بها المعجل الخطي، الذي يقوم بدوره بتعجيلها إلى طاقة 200 مليون إلكترون فولط (MeV). وبعد خروج البروتونات من المعجل الخطي يتم قذفها في حلقة السنكروترون الرئيسية. وتقوم رباعيات القطب النابضة وثنائيات القطب المصححة بمعادلة أثر مشكلة منع الاستقطاب بنوعيها. وتتم مراقبة الاستقطاب خلال شوط التعجيل باستخدام ثلاثة مقاييس للاستقطاب.



تقوم تجارب الاستطارة بسبر بنية البروتون بالطريقة التي قد يستخدمها مراقب الجمارك الواسع الخيال في البحث عن ماسة مخبأة في بالة كبيرة من القطن. يطلق المراقب النار من بندقية رش إلى داخل القطن ويلاحظ عدد الحبيبات التي تستطير في كل اتجاه. ويكون الانحراف الذي تسببه البالة الكبيرة اللينة صغيراً. ولكن الماسة الصغيرة الصلبة تجعل بعض الحبيبات ترتد في اتجاه المراقب. ومن معرفة عدد الحبيبات التي استطارت في كل اتجاه، يستطيع المراقب (باستخدام القوانين الهندسية) أن يحدد بكل دقة حجم الماسة وشكلها. وعند سبر بنية البروتون في جهاز AGS استخدم الباحثون البروتونات ذاتها لتؤدي دور الحبيبات.



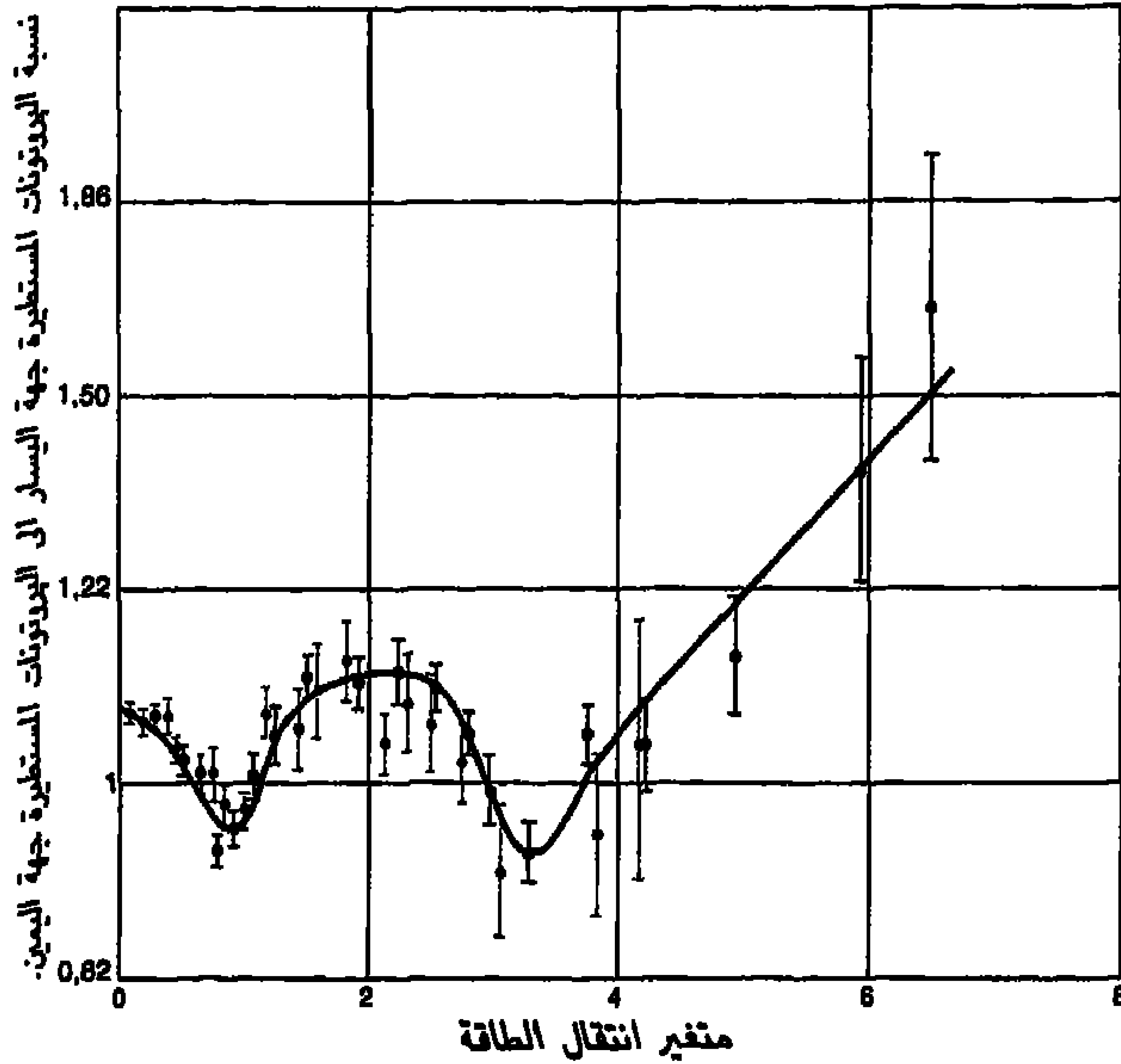
إن نسبة المقطع الفعال للسبينات المتوازية إلى المقطع الفعال للسبينات المتضادة (في الاتجاه) للبروتونات المستطيرة، تتذبذب عندما تتغير مميزات التصادمات. وفي الرسم البياني ثلاثي الأبعاد الموضح أعلاه، يمثل المحوران السفليان طاقة البروتونات في الحزمة الواردة والطاقة التي تنتقل أثناء التصادمات. ويزيد متغير انتقال الطاقة مع قيمة زاوية الاستطارة كما يتضح من القيم القليلة لهذه الزاوية المبينة في الرسم. ويمثل المنحني الأحمر معلومات استخلصت من بعض التجارب التي كان قياس زاوية الاستقطاب فيها يساوي 90 درجة بالضبط. وتمثل المنحنيات: الأزرق والبرتقالي والأخضر التجارب التي كانت فيها طاقة البروتونات الواردة تساوي 3 و6 وGeV12 على التوالي. وتمثل النقاط الأرجوانية الكبيرة نتائج طاقات أعلى في جهاز AGS. إن هذه النبابات الملاحظة تجريبياً لا يمكن بسهولة التوفيق بينها وبين تنبؤات الديناميكا اللونية الكمومية.

إن السنكروترونات القديمة مثل جهاز ZGS كانت تستخدم حقولاً مغنطيسية ضعيفة إلى حد ما للتبئير، مما جعلها تعرف بسنكروترونات التبئير الضعيف. ونظراً لأن التبئير كان ضعيفاً فإن حزمة البروتونات كانت تنفرج وتصبح واسعة جداً ومن ثم كان من الضروري جعل مقطع حجرة الخلاء، التي لها شكل الكعكة والتي تحوي البروتونات، كبيراً. وفي جهاز ZGS كانت حجرة الخلاء بعرض ثلاثين بوصة وارتفاع ست بوصات. وقد كان لهذه الأبعاد الكبيرة بعض الميزات. وأنا أذكر كيف مددت يدي داخل الكعكة في عام 1965 للمساعدة في إصلاح هدف مكسور دون فك المغنطيس المحيط بالكعكة والذي يبلغ وزنه 600 طن. ولسوء الحظ، كان من الضروري إحاطة حجرة الخلاء الكبيرة هذه بمغنطيسات أكبر منها. وتصل كلفة مثل هذه المغنطيسات إلى مبالغ باهظة جداً عند استخدامها في معجلات لطاقات أعلى. وقد كانت مغنطيسات جهاز ZGS بعرض 8½ قدم وارتفاع 4½ قدم، ويبلغ وزنها 11 طناً للقدم الطولي. ويعتبر جهاز ZGS الذي بدأ بناؤه في عام 1955 آخر السنكروترونات ضعيفة التبئير التي تم تشييدها.

كانت هناك حاجة إلى فكرة أفضل للوصول إلى طاقات أعلى. وفي الخمسينيات ابتدع (ن.س. كرستوفيلوس Nicholas C. Christofilos) و(إ.د. كورانت Ernest D. Courant) و(س.ل. لفنكستون Stanley Livingston) و(هـ.س. سنايدر Hartland S. Snyder) مبدأ التبئير الشديد. يستخدم هذا المبدأ مغنطيسات تسمى رباعية القطب، يتكون كل منها من قطبين مغنطيسيين شماليين وقطبين مغنطيسيين جنوبيين موضوعة بالتناوب في رؤوس مربع. وعندما تتحرك حزمة البروتونات داخل المربع تتأثر البروتونات، التي تنجرف بعيداً عن محور الحزمة، بقوة تبئير متزايدة الشدة تدفعها نحو المحور. ولسوء الحظ فإن رباعي القطب الواحد، لا يستطيع تبئير البروتونات في كلا الاتجاهين الأفقي والعمودي. فإذا حقق رباعي القطب تركيزاً بؤرياً لحزمة البروتونات في اتجاه واحد فإن الجسيمات تنفرج في الاتجاه الآخر وتتسرب من حجرة الخلاء.

إن سر التبئير الشديد يكمن في وضع اثنين من رباعيات القطب المتضادة في صف. عندئذ يُبئر رباعي القطب الأول الحزمة أفقياً ولكنه يجعلها تنفرج عمودياً، في حين يبئر رباعي القطب الثاني الحزمة عمودياً ويجعلها تنفرج أفقياً. فقد يبدو للوهلة الأولى أن التبئير والانفراج يلغي أحدهما الآخر ولا يحققان شيئاً. ولكن بتعديل دقيق لشدة رباعيي القطب يستطيع المرء أن يحقق تبئير الحزمة في كلا الاتجاهين. ونظراً للنجاح الباهر الذي حققته هذه الفكرة، صارت كل المعجلات التي تم بناؤها بعد عام 1960 تستخدم التبئير الشديد.

إن أزواج مغنطيسات رباعيي القطب تُجبر البروتونات على الذبذبة حول المحور المركزي لحلقة السنكروترون في شـكل موجات تسمى الذبذبات البيتاترونية . والذبذبات البيتاترونية



إن التخالف يسار ـ يمين في الاستطارة عند الطاقة 28 GeV وهي أعلى مما سبق، يمثل مشكلة أخرى للديناميكا اللونية الكمومية. عند استطارة حزمة من البروتونات غير المستقطبة من هدف مكون من بروتونات مستقطبة. كان عدد البروتونات المستطيرة جهة اليسار يزيد على عدد البروتونات المستطيرة جهة اليمين بنحو ثُلثي الأخير. وتبعاً للديناميكا اللونية الكمومية فإن الأعداد التي تستطير جهة اليسار وجهة اليمين يجب أن تكون متساوية. (ولو لم يكن الهدف مستقطباً، لكان العددان متساويين). وتمثل النقاط الملونة المعطيات التي حُصل عليها عند الطاقة 24 GeV في «سيرن»، المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات.

العمودية تجعل البروتونات تتحرك خلال الحقول المغنطيسية الأفقية التي تمنع استقطاب البروتونات التي يكون محور سبيناتها عمودياً. وعلى الرغم من ضعف هذه الحقول، فإن تعرض البروتون لعدد كاف منها يمكن أن يسبب دوران سبينه، وكلما زاد عدد القمم والبطون للذبذبات البيتاترونية زادت فرصة البروتون في الحركة عبر الحقل المغنطيسي في كل رحلة يقوم بها حول الحلقة.

ولحسن الحظ، اتضح في النهاية أن مشكلات منع الاستقطاب المتعلقة بالذبذبات البيتاترونية والحقول المغنطيسية الأفقية تقل كثيراً عن أثر منع الاستقطاب الناتج من الحقل العمودي مسبب الانحناء على البروتونات ذات السبين الأفقي. إن المحافظة على تراصف السبينات صعبة، ولكنها غير مستحيلة، عندما تدوّم البروتونات حول محور عمودي.

ووفقا لما سبق ذكره، فإن أكثر مشكلات منع الاستقطاب خطورة هي الرنينات مانعة الاستقطاب. ويحدث الرنين مانع الاستقطاب كلما تساوى رقمان حاسمان. الرقم الأول هو عدد دورانات السبين التي يعانيها كل بروتون أثناء قيامه برحلة واحدة حول الحلقة. والرقم الثاني هو عدد المرات التي يتذبذب فيها البروتون عبر الحقل المغنطيسي الأفقي في كل دورة. وفي جهاز AGS يقوم البروتون بنحو تسع ذبذبات بيتاترونية في كل رحلة حول الحلقة. وعندما يتساوى هذان الرقمان يمكن تخريب الاستقطاب كلياً في أقل من 10 ميكروثانيات، وهو الزمن المطلوب للقيام بأربع دورات في جهاز AGS.

ولمنع نشوء الرنين (التجاوب) أثناء تعجيل البروتونات، توخينا تغيير أحد الرقمين لحظة تساويهما، محققين بذلك «قفزة» عبـــر كل رنين مانع للاستقطاب. وقد آثرنا أن نغير عدد المـــرات التي يتعرض فيها البروتون لحقل مغنطيسي أفقي بتغيير عدد القمم والبطون في الذبذبات البيتاترونية. ولتحقيق ذلك عملياً بنينا مغنطيسات نابضة خاصة رباعية القطب يمكن تشغيلها في أقل من 2.5 ميكروثانية. وسرعان ما اكتشفنا أن مثل هذه المغنطيسات ذات الاستجابة السريعة لا يمكن صنعها من الحديد العادي. وعلى ذلك قررنا أن نجرب (الفرّيت) Ferrite، وهو مادة خزفية تحتوي على أكسيد الحديد. ويستطيع مغنطيس الفرّيت أن يولد حقولاً مغنطيسية شديدة في زمن قصير.

والمغنطيسات النابضة رباعية القطب نفسها قد تم بناؤها في متشيغان، في حين تم بناء مصادر القدرة الكبيرة لها في بروكهيفن. وهناك أسباب عديدة جعلت من بناء رباعي القطب تحدياً يواجهنا. فكان لابد من قطع الفرّيت، الذي يكلف الرطل منه خمسين دولاراً، بشكل (القطع الزائد) Hyperbola تماماً، ولكنه كان من الصلابة بحيث كان قطعه لا يتم إلا باستخدام الأدوات الماسية فقط، كما أنه كان يتكسر إذا زاد إحماؤه قليلاً أثناء عملية القطع. وقد شرع فريقنا المكون من صانعي الآلات والمهندسين والأساتذة والطلاب في حل هذه المشكلات بإقناع وزارة الطاقة الأمريكية بالتبرع بطن ونصف الطن مما لديهم من فائض الفرّيت، وإقناع جامعة متشيغان بشراء آلة تفريز تعمل بتحكم الحاسوب. وهكذا عمل الطلاب من ذوي الخبرة في الحاسوب والقطوع الزائدة، مع صانعي الآلات من ذوي المعرفة التامة بآلات التفريز وأدوات التقطيع الماسية. كما ثبت فوق آلة التفريز (مُستمهى) Aquarium يوضع فيها الفرّيت السهل الانكسار للمحافظة على درجة حرارته ثابتة أثناء عملية القطع. وفي النهاية آتى هذا المجهود ثماره وتم في عام 1983 تركيب 12 مغنطيساً نابضاً رباعي القطب في جهاز AGS.

يولد كل مغنطيس رباعي القطب حقله المغنطيسي الكامل ابتداء من الصفر خلال 1.6 ميكروثانية فقط. ومن أجل تحقيق هذه الاستجابة السريعة يحتاج كل مغنطيس إلى منبع ضخم ومعقد، يمرر تياراً كهربائياً شدته 1500 أمبير بفولطية تساوي 15000 فولت، أي بقدرة تبلغ 22.5 ميغاواط. ولحسن الحظ، فإن الوصول إلى القدرة القصوى لكل رباعيات القطب مجتمعة ـ أكثر من 200 ميغاواط ـ يحدث، أثناء عمل المعجل، خلال عدد قليل من الميكروثانيات في كل ثانية، بحيث يساوي متوسط القدرة، قرابة كيلواط واحد. وبعد الكثير من العمل الذكي الجاد تمكن فريق من المهندسين والفنيين في بروكهيفن من إنتاج منابع القدرة المعقدة، وكان كل منبع بحجم الشاحنة تقريباً يولد القدرة إلى رباعي قطب واحد بحجم مصباح المكتب.

ومن أجل التأكد من أن رباعيات القطب النابضة ستبدأ العمل بكل دقة لحظة مواجهة البروتونات كل رنين مانع للاستقطاب، اضطررنا إلى إجراء إصلاحات رئيسية في الحاسوب المتحكم في عمل جهاز AGS، لأنه يقوم بمراقبة دقيقة لطاقة البروتونات أثناء كل ميكروثانية من شوط التعجيل. ولكي يتحقق التحكم الصحيح في البروتونات المستقطبة، اضطر خبراء حاسوب جهاز AGS إلى القيام بتحسينات في دقة التحكم بعامل يساوي 10 تقريباً. وكان لنجاح مشروع التحسينات هذا فوائد جانبية، لأنه جعل جهاز AGS معجلاً أكثر دقة عند استخدامه للبروتونات غير المستقطبة. ولكن حتى هذه الدقة لم تكن كافية تماماً من أجل التحديد الدقيق للحظة التي تواجه فيها البروتونات رنيناً مانعاً للاستقطاب. وعلى ذلك لم يكن لدينا خيار عند إجراء التعديلات النهائية سوى استخدام أداة العلوم الرئيسية، ألا وهي المراقبة التجريبية.

وبعد كل ما تعرضنا له من الجهد الشاق ذهنياً وجسدياً ومالياً ـ والذي لم أذكر منه سوى القليل فقط ـ كانت دهشتنا بسيطة وسعادتنا غامرة عندما أدركنا أننا تمكنا بالفعل من تعجيل البروتونات الدوامة إلى 18.5 GeV وكانت أكبر نسبة للاستقطاب قريبة من 50%، وهذا يعني أن 75% من البروتونات كانت دوامة في اتجاه واحد و25% في الاتجاه المضاد. وكان جهاز AGS يقوم بتعجيل زهاء 20 بليون من البروتونات المستقطبة كل 2.4 ثانية.

بعد ذلك تحولنا بسرعة من علماء في فيزياء المعجلات إلى علماء تجريبيين في الطاقة العالية، وحاولنا أخيراً أن نجيب عن السؤال: هل نسبة المقاطع الفعالة للسبينات المتوازية إلى المقاطع الفعالة للسبينات المتضادة في الاتجاه، تزيد أم تنقص أم تبقى، لسبب خفي، ثابتة عند عامل يساوي 4 بالضبط عندما تتزايد طاقة التصادم إلى أكثر من 13 GeV؟ ولسوء الحظ، فإن عدد البروتونات المستطارة بزاوية قائمة يصير صغيراً جداً عند طاقات أعلى، ويزيد عدد البروتونات المستطارة بزوايا أصغر. وعلى ذلك فإن مجموعتنا التجريبية من بروكهيفن، وجامعة ميريلاند، ومعهد ماستشوستس للتقانة، وجامعة متشيغان وجامعة نوتردام والمعهد السويسري الفدرالي للتقانة وجامعة (تكساس A&M) بدأت بدراسة الاستطارات عند زوايا أصغر من 90 درجة، لأنها توفر معدلات أكبر لعدّ البروتونات.

وكانت النتائج تخبئ لنا مفاجأة أخرى. لقد وجدنا أنه عند طاقة تساوي 18.5 GeV تبدو نسبة المقاطع الفعالة للسبينات المتوازية إلى المقاطع الفعالة للسبينات المتضادة (في الاتجاه) قريبة جداً من 1، في حالة التصادمات العنيفة عند زوايا الاستطارة التي تقل كثيراً عن 90 درجة. وتشير نتيجة الرسم البياني، الذي رسمناه بناء على قياساتنا الجديدة إلى أن النسبة يمكن أن تتذبذب للأعلى والأسفل كلما زادت التصادمات طاقة وأصبحت أكثر عنفاً. إن هذه النتيجة، التي يمكن أن تؤيد ما تنبأ به (ن. تايورين) Nicolai Tyurin في معهد سيربوخوف في روسيا وآخرون من علماء الفيزياء النظرية من حيث وجود مثل هذه الذبذبات، ستجعلهم بكل تأكيد يشعرون بالرضى.

وعلى كل، فإن الرسم البياني يمكن أن يكون مبيناً لشيء مختلف. وعلى وجه التحديد، في حالة جسمين متماثلين مثل البروتونين، فإن التسعين درجة يمكن أن تكون زاوية استطارة خاصة تظهر عندها آثار فريدة. وفي عام 1978 ذُكرت للمرة الأولى أهمية هذه الزاوية في تجارب السبين من قبل (هـ.أ. بيثه) Hans A. Bethe من جامعة كورنيل و(ف.ف. وايسكوبف) Victor F. Weisskopf من معهد ماستشوستس للتقانة. وقد يكون من الممكن تفسير نتائجنا الجديدة عن التصادمات العنيفة عند الزوايا البعيدة من 90 درجة، بأنها تؤيد اقتراح «بيثه» و«وايسكوبف». وعلى الرغم من أن نسبة المقاطع الفعالة للسبينات المتوازية إلى المقاطع الفعالة للسبينات المتضادة تتغير بشكل مثير تبعاً لطاقة البروتونات الواردة، فإن أقصى نسبة عند كل طاقة تحدث دائماً عند الزاوية 90 درجة. وحديثاً تقدم (هـ. لبكين) Harry Lipkin من معهد وايزمان للعلوم وآخرون بنماذج محدَّدة بحيث يؤدي الاقتراب من الزاوية 90 درجة إلى زيادة كبيرة في قيمة النسبة. ويبقى الأمل معقوداً على تجارب جهاز AGS المستقبلية لمعرفة النظرية الصحيحة.

وهكذا ازداد اللغز غموضاً عندما وصلنا إلى طاقات أعلى في جهاز AGS. فهل تحقق، أخيراً، ما تنبأت به الديناميكا اللونية الكمومية من أن آثار السبين ستختفي عند الطاقات العالية؟ هناك نتيجة جديدة أخرى عند طاقة تساوي 28 GeV تجعلني أميل إلى نفي النبوءة. وقد توصلنا إلى هذه النتيجة عندما كنا نعد الأجهزة لإجراء تجربة الحزمة المستقطبة. تمت معايرة الأجهزة بمراقبة الاستطارة، المرنة العادية غير المستقطبة، لحزمة بروتونات جهاز AGS، من هدفنا المكون من البروتونات المستقطبة. ووفقاً للديناميكا اللونية الكمومية فإن عدد البروتونات التي تستطير جهة اليسار يجب أن يساوي عدد البروتونات التي تستطير جهة اليمين. وتتحقق

هذه النبوءة عند زوايا الاستطارة الصغيرة. وأنا أذكر أنني كنت أعتقد أنه حتى إن كانت الديناميكا اللونية الكمومية لا تفسر نتائجنا الأولية التي استخدمنا فيها جهاز ZGS، فإنها بلا شك يجب أن تكون صحيحة في حالة الاستطارة البسيطة يسار – يمين لحزمة غير مستقطبة من هدف مستقطب.

وعندما قمنا بإجراء التجربة في أواخر عام 1983، مكنتنا التحسينات الحديثة في هدفنا المكون من البروتونات المستقطبية، من استخدام حزمة من 100 بليون بروتون تقريباً في كل شوط، دون الإخلال بتراصف سبينات بروتونات الهدف. وقد كان عدد البروتونات التي تمت استطارتها على الهدف المستقطب يزيد بنحو مئة مرة عما تمت استطارته من قبل، مما أتاح لنا دراسة تصادمات أكثر ندرة وأشد عنفاً. وكان ذلك في الوقت الذي بدأت تظهر فيه المفاجآت الجديدة. ففي التصادمات العنيفة بالزوايا الكبيرة عند طاقة تساوي 28 GeV، كانت استطارة البروتونات تحدث إلى اليسار أكثر منها إلى اليمين، ومقدار الزيادة هو ثُلثا ما يستطير إلى اليمين.

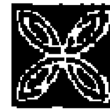
في البداية، كانت إمكاناتنا الإحصائية متواضعة. ولما انتهت المدة المقررة لنا لإجراء التجارب، طلبنا تمديداً جديداً لها، إلا أن اللجنة الاستشارية لمشاريع جهاز AGS قررت عدم إجابة طلبنا. وربما كان ذلك لأن العلماء النظريين في اللجنة اعتقدوا أننا راقبنا مجرد شذوذ إحصائي، وأن أي قياسات لاحقة سوف تؤيد الديناميكا اللونية الكمومية بأن أعداداً متساوية من البروتونات تستطير جهة اليسار وجهة اليمين. عندئذ اتخذ المدير المساعد في بروكهيفن، (ر.ب. بالمر) Robert B. Palmer قراراً نادراً أبطل فيه قرار اللجنة. إن النتيجة التي توصلنا إليها في وقت لاحق، وهي أن الاستطارة تعتمد فعلاً على الاتجاه، قد جلبت له السرور على الأرجح.

ماذا يعني هذا الفرق الذي راقبناه بين الاستطارة جهة اليسار والاستطارة جهة اليمين؟ ربما يكون التفسير، كما يرى بعض العلماء النظريين، هو أن كلاً من العنف والطاقة (28 GeV) في تصادماتنا ضعيف جداً بدرجة تجعلهما غير مؤهلين للاستخدام في نظرية أساسية مثل الديناميكا اللونية الكمومية ويمكن قريباً أن يتم استكشاف طاقات أعلى، بحيث يتم قياس الفرق في الاستطارة بين جهة اليسار واليمين باستخدام السنكروترونات البروتونية التي تُراوح الطاقة فيها بين 70 و800 GeV والموجودة في سيربوخوف وسيرن ومختبر فيرمي. وربما تتحقق في وقت لاحق طفرة عظيمة في الطاقة عند الوصول إلى الـ20 «تيرا إلكترون فولط» TeV (أي 20000 GeV) المقترح تحقيقها باستخدام «جهاز التصادم الأعظم مفرط الناقلية» Superconducting Supercollider. *[انظر «جهاز التصادم الأعظم المفرط التوصيل» مجلة العلوم، 2(5)،1987].*

ومع ذلك، فإن زيادة عنف التصادمات المرنة بعامل كبير تبدو صعبة، نظراً لأن التصادمات تصير أندر كلما زادت عنفاً. ومع أنني أتحلى بالصبر، فإنني غير راغب في الاضطلاع بتجربة يتم فيها حدث واحد كل 100 سنة. ويمانع أكثر مني طلابي الذين يحتاجون إلى مثل هذه الأحداث للحصول على الدكتوراه.

إن دراسة التصادمات المرنة عند الطاقات الهائلة وانتقالات الطاقة، اللازمة من أجل إجراء فحص تام للديناميكا اللونية الكمومية، تبدو بعيدة المنال في القرن الحالي. وربما يكون من الأفضل لنا أن نبحث عن نظرية جديدة أكثر فائدة لتفاعلات البروتونات الدوامة ولمكوناتها الدوامة. إن فهمنا النظري للقوة الكهربائية والقوة الضعيفة وقوة الجاذبية أفضل من فهمنا للقوة (النووية) الشديدة التي تربط الكواركات والبروتونات والنترونات. وربما يرجع السبب إلى أن القوة النووية هي من الشدة بحيث أن تقنية التقريبات النظرية المعروفة بنظرية الاضطراب لا فائدة منها. وفي الوقت نفسه فإن شدة القوة الشديدة بحد ذاتها تزيد من أهميتها بدرجة أكبر.

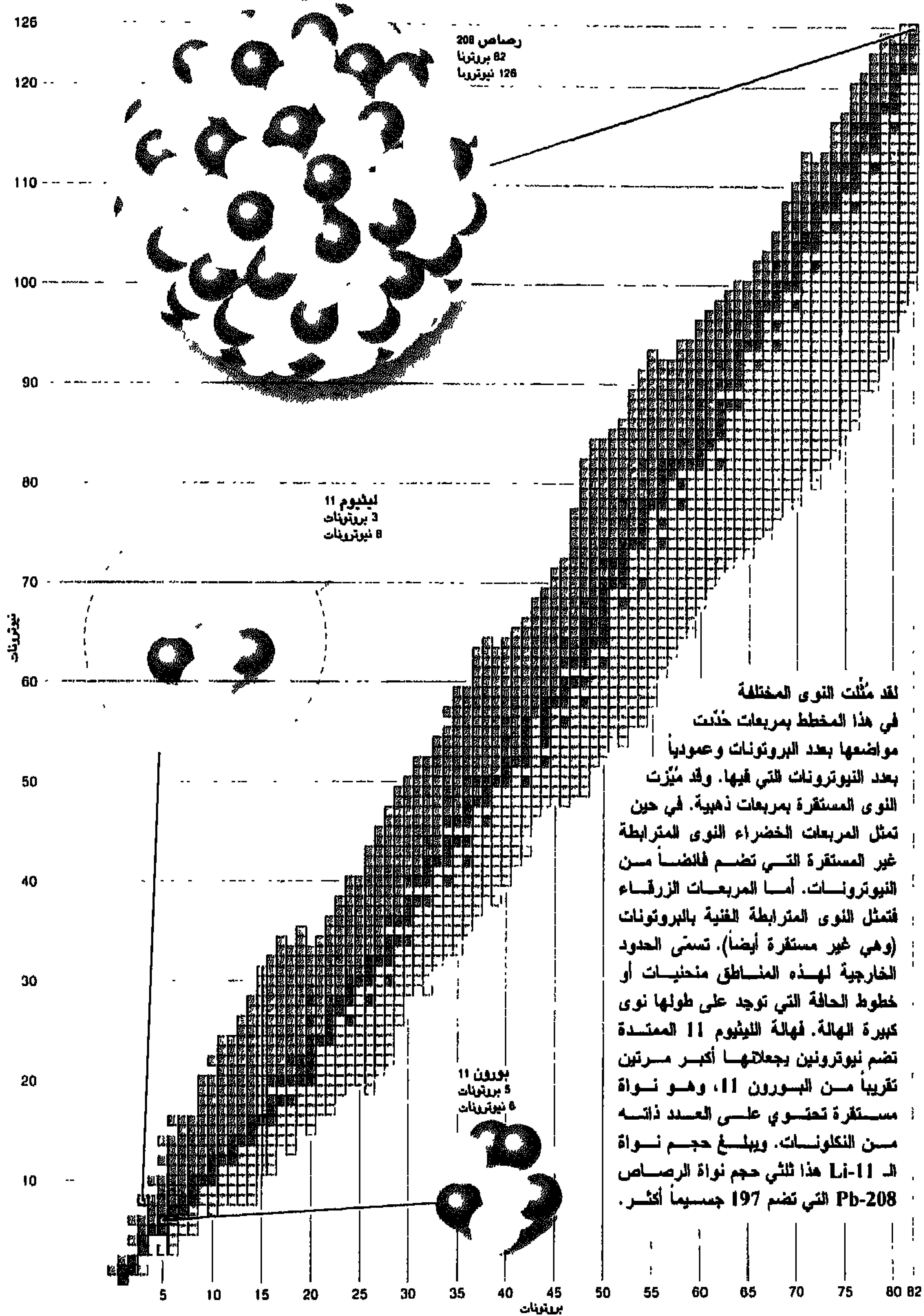
وكلما أطلت التحديق في معطياتنا خالجني شعور بأنها تحمل بين طياتها رسالة بسيطة بخصوص مكونات البروتون لم تنجح حتى الآن في فك شفرتها. كما أنني أمتنع عن تخمين ما يمكن أن يحدث، نظراً لأن المفاجآت كانت تحدث كلما قامت تجارب السبين بسبر المناطق التي لم يسبق استكشافها. ومن هذه المفاجآت، الاستقطاب الكبير لما يسمى بجسيمات (لامبدا) lambda التي يتم إنتاجها في تصادمات البروتون – البروتون العنيفة، والآثار الهائلة للسبين التي تظهر في تصادمات البروتون – البروتون عند الطاقة المنخفضة. ولما كنت عالماً تجريبياً، فإنني أستطيع، في النهاية، أن ألجأ فقط إلى قاضي الصدق وهو المراقبة التجريبية. وربما أعطت قياسات تُجرى في المستقبل القريب مؤشراً يساعد عالماً نظرياً شاباً، في النهاية، على فهم مكونات البروتون وقواها الشديدة.



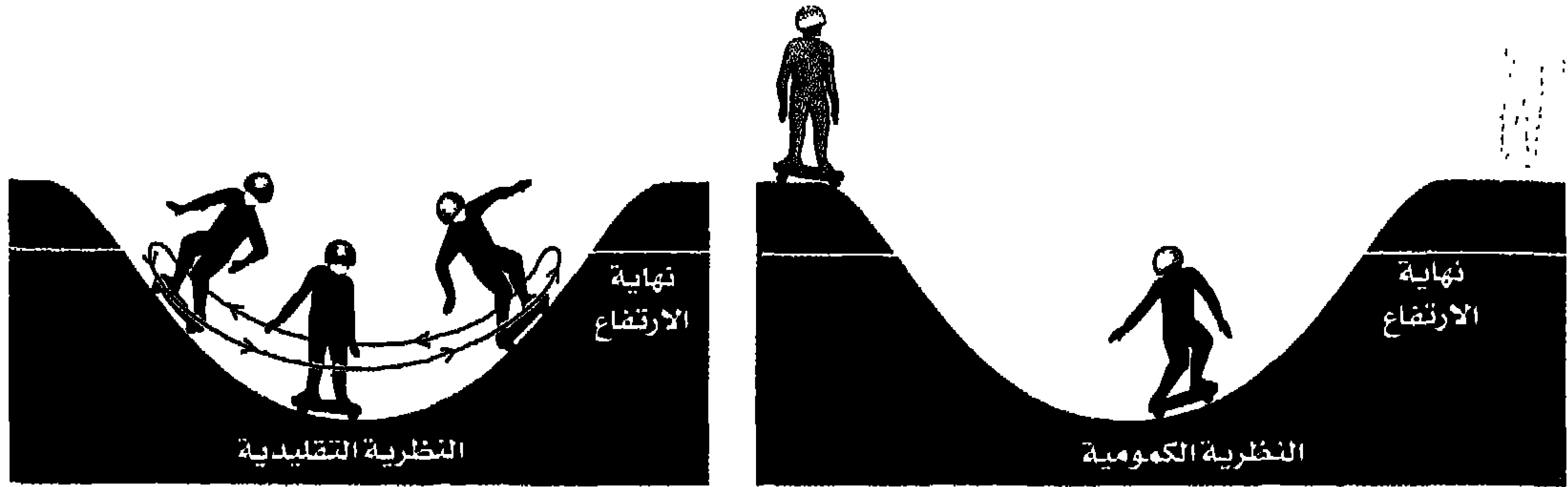
النّــــوى الهاليــــة

إن النوى التي لديها فائض من النيوترونات أو البروتونات تتأرجح على أطراف الاستقرار النووي. وتحت تأثير هذا الإجهاد، تطور بعض هذه النوى هالة حولها.

(س.م. أوستن). (ج.ف. برتش)



لقد مُثّلت النوى المختلفة في هذا المخطط بمربعات حدّدت مواضعها بعدد البروتونات وعمودياً بعدد النيوترونات التي فيها. وقد ميّزت النوى المستقرة بمربعات ذهبية. في حين تمثل المربعات الخضراء النوى المترابطة غير المستقرة التي تضم فائضاً من النيوترونات. أما المربعات الزرقاء فتمثل النوى المترابطة الغنية بالبروتونات (وهي غير مستقرة أيضاً). تسمّى الحدود الخارجية لهذه المناطق منحنيات أو خطوط الحافة التي توجد على طولها نوى كبيرة الهالة. فهالة الليثيوم 11 الممتدة تضم نيوترونين يجعلانها أكبر مرتين تقريباً من البورون 11، وهو نواة مستقرة تحتوي على العدد ذاته من النكلونات. ويبلغ حجم نواة الـ Li-11 هذا ثلثي حجم نواة الرصاص Pb-208 التي تضم 197 جسيماً أكثر.



تختلف الفيزياء التقليدية وفيزياء الكم في هاتين الصورتين لممتطي لوح التزحلق. ففي النظرية التقليدية (في اليسار)، يصل المتزحلق إلى ارتفاع محدد في كل من جانبي الحلبة، وذلك حسب مقدار طاقته، أما حسب القوانين الكمومية المتصوَّرة (في اليمين)، فيمكن أن يتحرك المتزحلق مجتازاً الحدود المفروضة بطاقته، ويبلغ ارتفاعات أعلى كما هو مبين باللون الأفتح (الباهت).

خلال خمسين السنة الماضية صوَّر الفيزيائيون النواة الذرية ــ المكونة من بروتونات ونيوترونات ــ كقطرة سائل لها سطح معرف جيداً. لكن الأمر ليس كذلك دائماً. إذ لاحظ الباحثون حديثاً في بعض المختبرات تركيباً جديداً بالكامل: ففي نوى معينة تتجرأ بعض (النيوترونات) Neutrons والبروتونات الداخلة في التركيب على الابتعاد عن سطح القطرة لتكوِّن سحابة ضبابية، أو هالة، وذلك إلى حد بعيد بالطريقة ذاتها التي تشكل بها الإلكترونات سُحُباً حول النوى التي تشترك معها في تكوين الذرات. ومن غير المدهش أن تتصرف هذه النوى الممتدة بشكل مختلف كثيراً عن تصرف النوى المعتادة. فالنوى المتعارفة صعبة الإثارة والتكسر أجزاء، في حين أن النوى ذات الهالة هي أجسام هشة. فهي أكبر من النوى المعتادة وتتفاعل معها أيضاً بسهولة أكثر. في الحقيقة، إن الهالة ظاهرة كمومية لا تطيع قوانين الفيزياء التقليدية. وهكذا فإن النوى ذات الهالة يمكن أن تطرح مجدداً مسألة سبر أغوار أحد الأسرار المركزية في الفيزياء، وتحديداً سر الترابط النووي.

وفي الحقيقة، ومنذ زمن بعيد، مازالت تحير الفيزيائيين الكيفياتُ الممكنة لاتحاد النيوترونات والبروتونات، أو (النكلونات) Nucleons، التي ستبقى معاً كنواة. ويعتمد هذا التوازن إلى حد ما على طرق حاذقة يحددها عدد النيوترونات والبروتونات المشاركة وصفات القوى الفاعلة فيما بينها. تتجاذب النكلونات كلها فيما بينها. ويرتبط كل واحد من البروتونات بآخر من النيوترونات لتشكيل أزواج، تدعى (دوتيرونات) Deuterons. نتيجة لذلك فإن النوى التي تحتوي على أعداد متساوية تقريباً من النيوترونات والبروتونات وحدها هي التي تكون مستقرة إلى الحد الذي تُصادَف معه طبيعياً على الأرض.

وتوجد في الطبيعة أيضاً نوى فيها أعداد غير متساوية من النيوترونات والبروتونات محدودة الأعمار (غير مستقرة أو لا نهائية العمر). وعلى الرغم من كونها مترابطة، بمعنى أنها تأخذ الطاقة لإبعاد أحد نكلوناتها، فإنها غير مستقرة. يمكن للنشاط الإشعاعي البتاوي (أشعة بيتا) أن يغيّر هذه النوى إلى نوى أكثر استقراراً بتحويل بعض نيوتروناتها الفائضة إلى بروتونات، أو بالعكس. تأخذ بعض هذه التحولات مجراها بعد بضع ملّي ثوان وأخرى لا تحدث إلا بعد ملايين السنين. وعلى العموم إذا مُثّلت النوى على منحن بياني حُمل فيه عدد البروتونات على محور الفواصل وعدد النيوترونات على المحور الآخر فإن النوى الأكثر بعداً عن القطر البياني تتمتع بأعمار أكثر قصراً.

وعند مسافة معينة من هذا القطرــ سواء فوقه أو تحته ــ تتحطم النوى بالضبط بالسرعة نفسها التي تتكون بها. ولا يمكن أن توجد نوى مترابطة بالفعل وراء حدود هذه المسافات المعروفة باسم (منحني الحافة[1]) Drip Lines. إن النوى الأكثر غرابة هي التي تقع بالكاد ضمن منحنيي الحافة على أطراف الاستقرار النووي، ولا تظهر مثل هذه المنظومات الغريبة إلا في بيئات أكثر عدوانية وأقل ودية بكثير من بيئتنا. فهي تنتج بالتفاعلات التي صنعت العناصر الثقيلة الموجودة في العالم وتنتج حالياً في الانفجارات النجمية الشديدة في المستعرات وفي المستعرات العظمى وفي تفجرات الأشعة السينية. ويعتقد فيزيائيو الفلك بأن النوى الواقعة على طول منحني الحافة السفلي توجد في قشور النجوم النيوترونية.

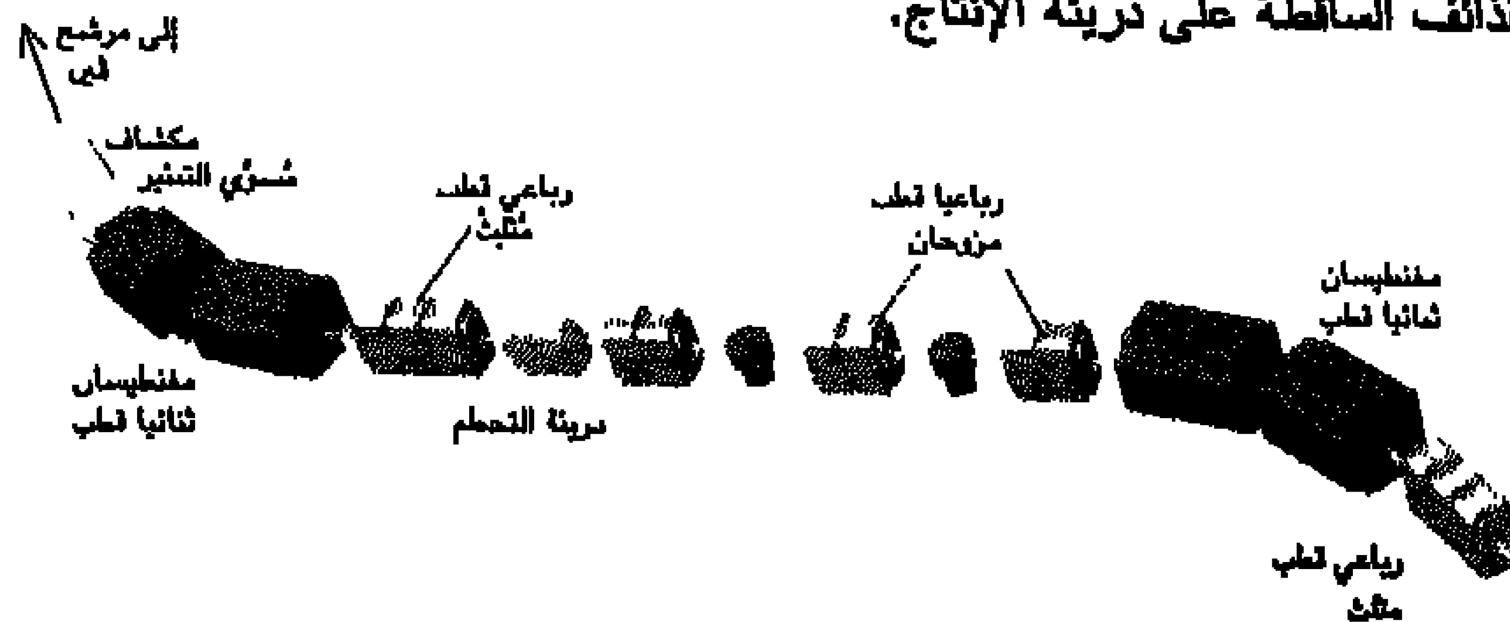
باكورة الأدلة على الهالات النيوترونية:

قبل عقد مضى توافرت للفيزيائيين وسائل قليلة لدراسة مثل هذه النوى الهالية. وبعدئذ طوَّر (إ. تانيهاتا) ومعاونوه، (في مختبر لورانس بيركلي) تقانة لملاحظة الكيفية التي تتفاعل بها النوى غير المستقرة مع النوى الأخرى. قادت هذه الطريقة إلى اكتشاف هالات في نوى مختلفة. وأكثر نواة بهالة تم فحصها حتى اليوم كانت نواة

[1] خطوط التقطر. وتعود التسمية إلى نموذج القطرة السائلة للنواة الذي وضعه (ن. بور) في الثلاثينيات. (المحرر)

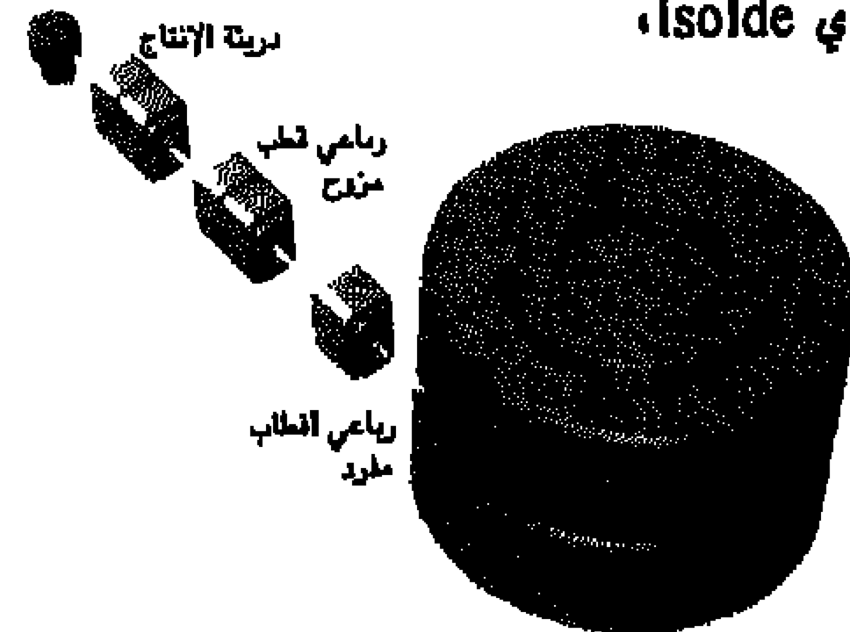
صنع نوى غريبة

خلال العقد الماضي قام المجربون بتطوير طريقتين أساسيتين مختلفتين لدراسة النوى الهالية. وقد قام بعضهم بفحص الشظايا من نوى الدريئة (الهدف)، في حين قام البعض الآخر بتحليل شظايا القذائف الساقطة على دريئة الإنتاج.



في الاستراتيجية الأولى، يجب استخلاص النظائر المطلوبة من مادة الهدف. فإن كان العنصر طياراً فإن نظائره تنتثر إلى خارج الدريئة بفعل التسخين ومن ثم يمكن لهذه النظائر أن تؤيّن وتُفصل . تسمى هذه الطريقة آيسول Isol (فصل النظائر المكشوف (Isotope Separation on Line).

وقد قيس عمر الليثيوم Li-11 أول مرة باستخدام آيسول دي Isolde، وهو مختبر من نوع ISOL في سيرن. وتصمم حالياً تجهيزات جديدة في مختبـر أوك ردج الوطني بتنيسي وفي العديد من المختبرات الأخرى حول العالم.



وفي الطريقة الثانية، تُحطم الدريئة النوى القاذفة إلى شظايا تتحرك بالسرعة العالية ذاتها التي كانت تسير بها القذيفة، ومن ثم ندرس هذه الشظايا غير عادية الخواص. وفي خلاف ظاهري للمنطق تُسهّل السرعة العالية للحزمة دراسة كثير من النوى، لاسيما تلك النظائر القصيرة العمر مثل الــLi-11 (عمر النصف Half-Life لهذه المادة هو 9 ملّي ثوان فقط). وكثير من المختبرات المعروفة بمختصرات أسمائها مثل كانل في كانْ بفرنسا، وNSCL في جامعة ميتشيكان الحكومية، وريكن قرب طوكيو وGSL قرب دارمشتاد بألمانيا ــ قامت ببناء وسائل من هذا النوع للتعامل مع حزم مشعة وتدرس نوى غير مستقرة.

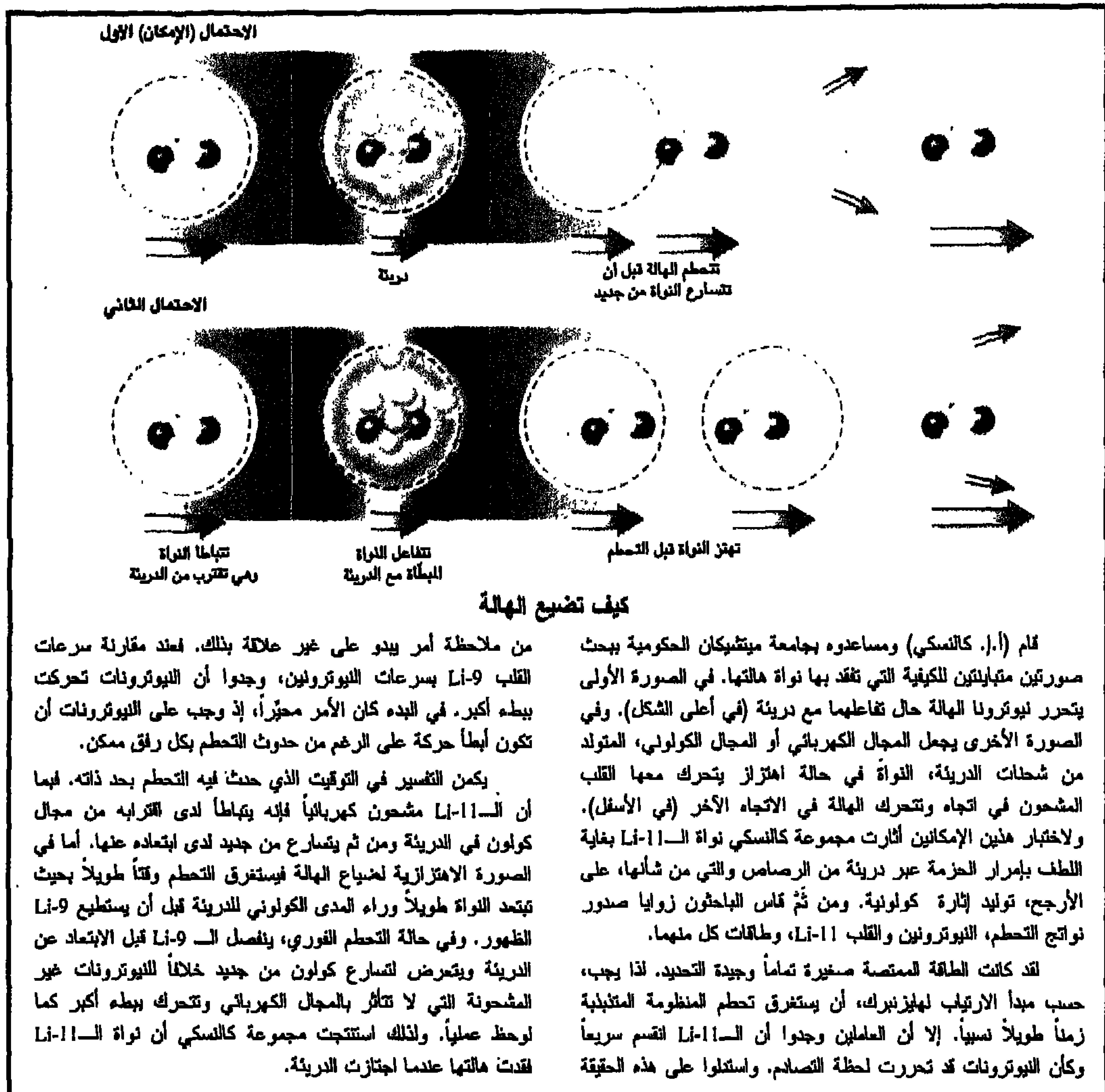
ففي عام 1990 قام (ب.م. شريل) ومشاركوه ببناء مفرّق للشظايا لولاية ميتشيكان سمّي A1200. وهو يعمل على فصل النوى الغريبة بإخضاع حزمة الشظايا إلى قوى متنوعة (في اليسار). فالمغنطيسات الثنائية القطب Dipole Magnets تحني شظايا الحزمة حسب اندفاعات النوى وشحناتها؛ وتعمل المغنطيسات الرباعية القطب المزوجة والمثلثة على تبئير الحزمة.

يمكن أيضاً إرسال الحزمة عبر شريحة رقيقة تعمل على إبطاء النوى بمقادير مختلفة تعتمد على سرعاتها وشحناتها. إضافة إلى أنه يمكن توجيه الحزمة إلى مرشح فين Wien، وهو أداة (نبيطة) تنتج مجالات كهربائية ومغنطيسية معامدة؛ ولا تمر به إلا النوى ذات السرعة المختارة. أخيراً، يمكن أحياناً قياس الزمن الذي تستغرقه نواة لعبور جهاز التفريق فنحصل على قياس آخر لسرعتها. ولقد تمكّن الباحثون ــ مسلّحين بكل هذه المعلومات ــ من مماثلة النوى العابرة كل على حدة وقياس سرعاتها واندفاعاتها.

نظير الليثيوم -11، والتي فيها ثلاثة بروتونات وثمانية نيوترونات. ولقد أظهرت تحليلات بنيتها السريعة الزوال الشيء الكثير عن الطبيعة المدهشة للهالات بشكل عام.

اكتشف العاملون في مختبر لورانس بيركلي نواة الــLi-11 عام 1966، لكن لم تصبح بنيتها غير العادية واضحة إلا بعد مرور أكثر من عقد كامل. وفي عام 1985 حاول تانيهاتا قياس حجمها، فصادم نوى عادية عند الطاقات العالية لإنتاج حزمة من النظائر غير المستقرة في عملية عُرفت باسم (تشظية القذيفة) Projectile Fragmentation. ومن ثم وضع غشاء رقيقاً من الكربون يعترض الحزمة وقام بعدّ نوى الحزمة التي بقيت سالمة بعد عبور الغشاء. يعكس عدد الذرات العابرة هذا مقدار احتمال تفاعلها مع نوى الغشاء الدريئة (الهدف). يعبّر الفيزيائيون عن هذا الاحتمال بمقياس يدعى (المقطع العرضي) Cross Section. وجد تانيهاتا أن نوى الــ Li-11 على وجه الخصوص تمتلك مقاطع عرضية كبيرة. والتفسـير الذي لاح هـو أن النـوى كانت هاليــة الشكل . وكان نيوترونان من نواة الــ Li-11 مرتبطين بشكل ضعيف لدرجة أنهما يحومان (يطوفان) بعيداً عن القلب، حيث يسهل سلخهما بعيداً بوساطة الدريئة.

إنه اكتشاف صاعق. فتبعاً لقوانين الفيزياء التقليدية يجب أن يبقى الجسم المرتبط داخل حدود مدى القوى المركزية. لكن في ميكانيك الكم يؤدي أثر النفق، الذي يدعى أحياناً (المروق) Tunneling، إلى جعل الهالات أمراً ممكناً. لتصوُر هذه الظاهرة، تخيل شخصاً يعتلي لوحاً للتزحلق في حلبة على هيئة جرن. تحدد الطاقة الكلية للمتزحلق المسافة التي يبلغها؛ فكلما زادت طاقته زاد الارتفاع الذي يصل إليه. وهو لن يقدر على بلوغ ارتفاع أعلى مما يقابل مقدار الطاقة التي يودعها حركته. وليس الحصر في ميكانيك الكم بهذه الصرامة، فحتى المتزحلق الكسول يمكن أن يرتفع فوق الحلبة أحياناً. والزمن الذي يمكن أن يقضيه خارج الحلبة محدود وهو يتعلق، حسب مبدأ الارتياب لهايزنبرك، بالطاقة الإضافية التي يحتاج إليها للخروج من الحلبة. وكلما انخفض مقدار الطاقة اللازمة للخروج ازدادت مدة مكوث المتزحلق خارج الحلبة.



كيف تضيع الهالة

قام (أ.ا. كالنسكي) ومساعدوه بجامعة ميتشيكان الحكومية ببحث صورتين متباينتين للكيفية التي تفقد بها نواة هالتها. في الصورة الأولى يتحرر نيوترونا الهالة حال تفاعلهما مع دريئة (في أعلى الشكل). وفي الصورة الأخرى يجعل المجال الكهربائي أو المجال الكولوني، المتولد من شحنات الدريئة، النواةَ في حالة اهتزاز يتحرك معها القلب المشحون في اتجاه وتتحرك الهالة في الاتجاه الآخر (في الأسفل). ولاختبار هذين الإمكانين أثارت مجموعة كالنسكي نواة الــLi-11 بغاية اللطف بإمرار الحزمة عبر دريئة من الرصاص والتي من شأنها، على الأرجح، توليد إثارة كولونية. ومن ثَمّ قاس الباحثون زوايا صدور نواتج التحطم، النيوترونين والقلب Li-11، وطاقات كل منهما.

لقد كانت الطاقة الممتصة صغيرة تماماً وجيدة التحديد. لذا يجب، حسب مبدأ الارتياب لهايزنبرك، أن يستغرق تحطم المنظومة المتذبذبة زمناً طويلاً نسبياً. إلا أن العاملين وجدوا أن الــLi-11 انقسم سريعاً وكأن النيوترونات قد تحررت لحظة التصادم. واستدلوا على هذه الحقيقة من ملاحظة أمر يبدو على غير علاقة بذلك. فعند مقارنة سرعات القلب Li-9 بسرعات النيوترونين، وجدوا أن النيوترونات تحركت ببطء أكبر. في البدء كان الأمر محيّراً، إذ وجب على النيوترونات أن تكون أبطأ حركة على الرغم من حدوث التحطم بكل رفق ممكن.

يكمن التفسير في التوقيت الذي حدث فيه التحطم بحد ذاته. فبما أن الــLi-11 مشحون كهربائياً فإنه يتباطأ لدى اقترابه من مجال كولون في الدريئة ومن ثم يتسارع من جديد لدى ابتعاده عنها. أما في الصورة الاهتزازية لضياع الهالة فيستغرق التحطم وقتاً طويلاً بحيث تبتعد النواة طويلاً وراء المدى الكولوني للدريئة قبل أن يستطيع Li-9 الظهور. وفي حالة التحطم الفوري، ينفصل الــ Li-9 قبل الابتعاد عن الدريئة ويتعرض لتسارع كولون من جديد خلافاً للنيوترونات غير المشحونة التي لا تتأثر بالمجال الكهربائي وتتحرك ببطء أكبر كما لوحظ عملياً. ولذلك استنتجت مجموعة كالنسكي أن نواة الــLi-11 فقدت هالتها عندما اجتازت الدريئة.

بالنسبة لجسم كبير كبَر شخص يمتطي لوح التدحرج يكون احتمال المروق (فعل النفق) على درجة من الصغر لا يمكن تخيلها، أما على المستويين الذري والنووي فيمكن أن يكون الفعل ذا قيمة ملموسة، وحسب مراقبة تانيهاتا كان الحدث في حالة الــLi-11 مثيراً. فطاقة ارتباط النيوترونين الأخيرين تساوي بضع مئات ألوف الإلكترون فلط فقط، أي أصغر من طاقة الترابط المعتادة بأكثر من مرتبة كاملة. ولذا تحتاج هذه النيوترونات المتطرفة إلى طاقة صغيرة جداً لتبتعد منسلخة عن النواة. وهي تستطيع البقاء بعيداً هناك لزمن طويل نسبياً، وتكوّن بانتشارها هالة قليلة الكثافة. وفي الحقيقة، بمقارنة حجم الهالة بحجوم النوى الأخرى، فإن متوسط بعد هالة الــLi-11 من مركزها وحتى أطرافها يقارب 5 فمتومتر، أي أكثر من ضعف المسافة في نواة عادية لها الكتلة ذاتها.

بيّنت أعمال إضافية أن نواة الــ Li-11 غير عادية في نواح أخرى. فنظير الــLi-10، الذي يحتوي على نيوترون واحد أقل، غير مترابط، وهذا يعني أن بروتوناته الثلاثة ونيوتروناته السبعة لا تتماسك معاً لتشكل النواة. وإذا ما أزيل نيوترون واحد من الــLi-11 فإن نيوتروناً آخر سيخرج في الحال أيضاً تاركاً خلفه الــLi-9. وعليه فإن الــLi-9 والنيوترونين كلها مترابطة كمنظومة من ثلاثة أجسام تتفصل إذا ما أزيل أحد عناصرها (أجسامها) الثلاثة. لهذا السبب نعت (م. زوكوف) (من جامعة كوتبرك في السويد) نواة الــLi-11 باسم نواة (بوروميونية) Borromean؛ لأنها تشبه شارة الحكام في الإمارة الإيطالية (بوروميو) Borromeo. إذ يوجد في خوذهم ثلاث حلقات متشابكة بحيث إذا أزيلت حلقة واحدة تنفصل الأخريان. وهناك ستة أمثلة أخرى معروفة عن النوى البوروميونية.

هالات مُميزة

درس (ر. لوكارت) والعاملون معه في المركز سيرن، وهو مختبر لفيزياء الجسيمات قرب جنيف، التفاعل المتبادل بين مركبات الـ Li-11 الثلاثة (نيوتروني الهالة والقلب Li-9)، مركِّزين بشكل خاص على اختبار ما إن كان للهالة أي تأثير في القلب. فقد قاموا بقياس الخواص المغنطيسية والكهربائية للنظير بطريقة ذكية ووجدوا أنها تطابق خواص نواة الـ Li-9. وبما أن نيوتروني الهالة لا يحملان أية شحنة ـ وهما كزوج لا يملكان أي (سبين) Spin أو عزم مغنطيسي ـ فإن هذه النتيجة تؤازر فكرة أن القلب Li-9 ونيوتروني الهالة جسمان مستقلان تقريباً.

وانطلاقاً من هذه المعلومة أمِل المجرِّبون أن يتعرَّفوا الكيفية التي ينتظم بها النكلونان المنفردان في نوى الـ Li-11. وللكشف عن هذا لجأ (ت. كوباياشي) ومعاونوه (في مختبر لورانس ببركلي) إلى فحص توزعات (الاندفاع «الزخم») Momentum في نوى الـ *Li-11*. هذا وتحقق حركتها في ظل قوانين ميكانيك الكم علاقة أخرى أيضاً، تمثل جزءاً من مبدأ الارتياب لهايزنبرك. وهي تفيد بأن الجسيمات لا يمكن أن تمتلك اندفاعاً محدداً بدقة بل مجالاً من الاندفاعات يعتمد مداه على توزعها في الفضاء الذي تعكسه دالتها الموجية. وكلما كانت الدالة الموجية أكثر انتشاراً وسلاسة كان اندفاع الجسيم أكثر تحديداً. وعليه إذا امتدت هالة لمسافة كبيرة وحطم ارتباطَها بالقلب هدفٌ ما، فإن اندفاعات النيوترونات المفصولة لن تنحرف إلا قليلاً عن اندفاعاتها الابتدائية، ولذا تسير تقريباً مباشرة إلى الأمام وبالسرعة ذاتها.

سلك كوباياشي وفريقه طريقاً غير مباشرة إلى حد ما لاستنتاج اندفاع الهالة. فأنتجوا تفاعلات يتم فيها سلخ نيوتروني الهالة في الـ Li-11، ومن ثم راقبوا القلب المتبقي Li-9 الذي ارتحل قُدُماً. وبما أن اندفاع الـ Li-11 الابتدائي ثابت القيمة فإن (الانتشار) Spread في اندفاع القلب يجب أن يطابق انتشار اندفاع النيوترون. وقد وجد الباحثون باستعمال هذه العلاقة، أنّ توزع (انتشار) الاندفاع على درجة كبيرة من الضيق، ويمثل قرابة خُمس التوزع المشاهَد خلال تحطم النوى العادية.

وفي تجارب أجريت فيما بعد في كانل بمدينة كان الفرنسية، بإشراف (أ.س. مولر)، تم قياس انحراف النيوترونات بحد ذاتها بدلاً من انحراف القلب. وفي هذه الظروف توجهت النيوترونات من النوى الهالية إلى الأمام في مخروط يقارب عرضه درجتين، في حين أن النيوترونات من النوى العادية خرجت في مخروط عرضه نحو عشر درجات. ومن سوء الحظ، بدا إلى حد ما تفسير هذه التجارب كمياً على جانب من الصعوبة؛ لأن القوى المرنة المؤثرة من الهدف كانت تحرف الجسيمات أيضاً.

وقد وجد فريق في جامعة ميتشيكان الحكومية، مؤلّف من (ب.م. شريل) و(ن.أ. أور) وأحدنا (أوستن)، طريقة للالتفاف حول هذا القيد. تعمل القوى المرنة على حرف الجسيمات نحو الجوانب بشكل أساسي ويصعب أن تغيِّر من مركبة الاندفاع الموازنة لاتجاه الحزمة، وقد اتضح لنا أن تأثير (تدخل) الهالة يكون أوضح إذا تمكنا من قياس الانتشار في الاندفاع الموازي؛ إلا أن حزمة الـ Li-11، التي كنا نستعملها كان فيها أصلاً انتشار في الاندفاعات أكبر بعشر مرات من الأثر المراد قياسه. لحسن الحظ يسمح (مفرِّق «فاصل» الشظايا) Fragment Separator في ولاية ميتشيكان. سميّ «A1200»، للمجرِّب بتبديد الحزم وتبئير الجسيمات في مواضع تتبع مقدار تغيّر اندفاعاتها بدلاً من أن تتبع اندفاعاتها الأساسية. بهذه الطريقة يستطيع المفرِّق انتخاب أو فرز تغيرات الاندفاع الناشئة عن التحطم.

فباستخدام هذا الأسلوب المسمّى (منوال فقدان الطاقة) Energy – Loss Mode حصل العاملون بولاية ميتشيكان على مقدار (ميز) Resolution أصغر كثيراً من عرض توزع الاندفاع الذي رغبوا في قياسه. وهنا (نرط) Struck حزمة من الـ Li-11 أهدافاً متنوعة تقع كتلتها بين البريليوم واليورانيوم، وُضعت بالقرب من مركز الأداة (النبيطة، الجهاز) Device على التوالي واحداً في كل مرة. فأبدت نوى الـ Li-9 الناتجة من هذه التحطمات توزعاً ضيقاً للاندفاعات؛ وكان عرض هذا التوزع مستقلاً تقريباً عن كتلة الهدف. وبما أن التفاعلات النووية هي التي توسطت التحطم بالنوى الخفيفة، في حين أن القوى الكهربائية ـ أي قوى كولوم ـ كانت المؤثرة في التحطم بالنوى الثقيلة، فإن هذا جعلنا ندرك بأن النتيجة كانت مستقلة عن آلية التفاعل وأنها تعكس مباشرة تركيب الهالة. وتشير هذه النتائج إلى أن نصف قطر هالة الـ Li-11 كان أكبر بأكثر من مرتين من نصف قطر القلب: *Li-9*.

نماذج وتنبؤات

في حين كانت هذه التجارب مستمرة، كان النظريون يحاولون فهم التصرف المتميز للنظير Li-11 وواجهوا عقبتين حائلتين، ومازالوا. إحداهما هي أن القوى بين النكلونات غير معلومة بشكل دقيق يسمح بالتنبؤ بخواص الترابط الضعيف والحاذق لنوى الهالة. والأخرى، حتى ولو أن تلك القوى كانت معلومة فإن حواسيب اليوم لا تمتلك السرعة أو الذاكرة اللازمتين لحل معادلات ميكانيك الكم للتفاعل ما بين أحد عشر نكلوناً. وعلى الرغم من ذلك، قام الفيزيائيون بتطوير نماذج بسيطة تظهر الخاصيات الفيزيائية الرئيسية للنوى الهالية.

ومن الخاصيات التي حاولوا التوقف عندها بنماذجهم هي دور (التزاوج) Pairing في المنظومات الكثيرة النكلونات. والتفاعل التزاوجي عموماً هو التجاذب ما بين الجسيمات الأضعف ارتباطاً في المنظومة؛ وهو يستطيع التأثير جذرياً في خواص تلك المنظومة. ففي المعادن، مثلاً، يؤدي التزاوج ما بين الإلكترونات

قياس العزوم الكهربائية والمغنطيسية

قارن (ر. نوكارت) والعاملون معه في سيرن الخواص المغنطيسية والكهربائية لكل من العنصرين Li-11 وLi-9 بوساطة جهاز فريد. حيث عمل مجال كهربي على حرف الأيونات الخارجة من المفرّق آيسول دي لتعبر أنبوبة الحزمة حيث تجتاز غازاً وتتعادل شحنتها. وغمّر هذه الحزمة على طولها ضوء ليزري مستقطب يرصف سبينات ذراتها. ومن ثم أوقفت الذرات في بلورة. وبسبب المجال المغنطيسي المحيط بهذا الجزء من الجهاز مبادرة محور السبين (التدويم) وتغيير اتجاهه، وبعد بضع ملّي ثوان عانت النوى تفكك بيتا قاذفة الإلكترونات في اتجاه مفضّل هو اتجاه محور السبين. واستطاع المجرِّبون، اهتداء بتوجهات إصدرات إلكترونات التفكك هذه، استنتاج الخواص الكهربائية والمغنطيسية للنواة.

إلى ظهور الموصلية (الناقلية) الفائقة. والتفاعل التزاوجي ذو أهمية أساسية أيضاً في كل وجوه البناء النووي تقريباً؛ فهو الذي يحدد النوى المستقرة، ووجوده يعزز الميوعة في عمليات تغيير الشكل مثل عملية الانشطار النووي. ويستطيع التزاوج في غاز نيوتروني مخلخل التأثير في خواص النجوم النيوترونية، التي تعتمد على ما إذا كانت النيوترونات تتصرف كمائع فائق. وأخيراً يؤدي التزاوج إلى السلوك البورروميوني.

لقد تم تطوير نماذج مفيدة تغطي مجالاً واسعاً وتقوم على افتراضات مختلفة جداً حول التزاوج. فلقد اقترح (ب.س. هانسن) (من جامعة آرهوس بالدنمارك) و(ب. جونسون) (من جامعة تسالمرز للتقانة بالسويد) نموذجاً بسيطاً عام 1988. فقد افترضا أن التزاوج بين النيوترونين الأخيرين في الـLi-11 كان قوياً لدرجة أنه يمكن معالجة هذين النكلونين كجسمين سمّي أحدهما (الدينترون) Dineutron (ذا النيوترونين، ثنائي النيوترون).

إن حركة الدينترون في مجال القلب الـLi-9 تمثل مسألة ذات جسمين، وهي مسألة سهلة الحل نسبياً. وفي الواقع، إذا كان الترابط ضعيفاً ــ بحيث تكون فرصة تفاعل الجسمين ضئيلة، فإنه يمكن إيجاد الدالة الموجية في كتاب دراسي. وقد اشتق هانسن وجونسون باستخدام هذا التقريب صيغاً لحجم الهالة، ولاحتمال تحطم النواة في المجال الكهربائي لهدف عالي الشحنة ولطاقة الدينترون بعد التحطم. ومع ذلك لم يتمكنا بمثل هذا النموذج البسيط من حساب طاقة ارتباط الهالة.

وخلال مرحلة تعليمه الجامعية في ولاية ميتشيكان، بحث (ج. فوكسويل) في نموذج متطرف آخر تحت إشراف أحدنا (برتش). وهنا على النقيض من صورة الدينترون، يهمل نموذج فوكسويل التزاوج بين النيوترونات تماماً. فهو يفترض أن كلاً من النيوترونين الأخيرين يرتبط بالقلب مستقلاً عن الآخر. عندئذ تُحلّ مسألة الجسمين لكل من النيوترونين على حدة. وقام فوكسويل بحساب احتمالات التحطم وحساب طاقة المنظومة المثارة. وكما هي الحال في نموذج هانسن وجونسون، يتطلب نموذج فوكسويل معرفة طاقة الترابط مسبقاً. ومن المثير أن هاتين الاستراتيجيتين المختلفتين جداً أنتجتا تنبؤات متشابهة حول هشاشة الـLi-11، ولم تختلفا إلا في عامل قدره اثنان، عند تقدير المقطع العرضي لها.

آخر الأعمال حول الهالات

قام النظريون بعدئذ ببناء نماذج أكثر حنكة، تحتوي على نحو بيّن القوى التي تؤدي إلى التزاوج. وبما أن مسالة الأجسام الثلاثة في الميكانيك الكمومي أصبحت مطواعة للحل العددي بوساطة الحواسيب الكبيرة، كان من العملي البحث في الـLi-11 كمنظومة ذات ثلاثة جسيمات. وقد حسب (هـ. إسبنس) (من مختبر أركون الوطني) دالة الـLi-11 الموجية مستخدماً وصفاً واقعياً للتفاعل بين النيوترونات والقلب Li-9 ومعالجة أكثر قرباً من قوة التزاوج. ولقد أوضحت دالته الموجية بأنه عندما تكون النيوترونات بعيدة في الطرف الخارجي للهالة يصبح من المرجح أن يكون طرفاه قريبين أحدهما من الآخر.

من الناحية الأخرى، عندما يكون النيوترونان قريبين من القلب، فإنهما يميلان للبقاء مبتعدين أحدهما عن الآخر. وهكذا فإن ميكانيك الكم الفعلي للتزاوج يصف سلوكاً في حدود النموذجين

المتطرفين. ويقع المقطع العرضي المحسوب هنا في منتصف الطريق ما بين تنبؤات هذين النموذجين ويتفق مع التجربة. وكما هي الحال غالباً في الفيزياء النووية، يمكن أن تكون النماذج المختلفة تماماً مقبولة الأداء، كما يمكن أن تتراكب مجالات صلاحيتها. لقد كان نموذج الأجسام الثلاثة ناجحاً أيضاً في توقع لانتشار الاندفاع أثناء تحطم الـ Li-11 المقيس بتجهيزات ولاية ميتشيكان.

قام (إ. طومسون) والعاملون معه في جامعة سري بحسابات مماثلة. وقد استعملت هذه المجموعة قوة أكثر واقعية ما بين النيوترونات ولكنها عالجت التفاعل نيوترون – قلب بطريقة أكثر تقريبياً. فوجدت هي أيضاً أن الـ Li-11 بوروميوني البنية وله هالة كبيرة. وقد أعطتنا مثل هذه النتائج المتناغمة الثقة بأننا نفهم التزاوج بين النيوترونات في وسط أو بيئة قليلة الكثافة، كما هي الحال، ربما، في (قشور) Crusts النجوم النيوترونية.

ومن الطبيعي أن يطرح المرء الآن، وقد اكتُشفت سمة جديدة في السلوك النووي وتمت دراستها، السؤال التالي: إلى أين سنتجه من هنا؟ أو إلى أين المستقر؟ من الواضح أن الهالات تنزع إلى تفاعلات نووية كثيرة. فمثلاً، يخطط المجربون لتفاعلات بين الـ Li-11 والبروتونات للتوصل إلى قرار بشأن احتمال أن يلتقط البروتون نيوترونين ويكوّن التريتيوم. يؤثر الترابط بين النيوترونين مباشرة في هذا الاحتمال، لأنهما يجب أن يكونا قريبين أحدهما من الآخر لكي يتحدا مع البروتون القاذف لإنتاج التريتيوم. وبتحليل مثل هذه التفاعلات نتمكن من الحصول على قياس مباشر لتلك الترابطات.

لقد أوضحت تجارب قام بها (ك. ريزاكير) ومعاونوه في المركز سيرن بأن النوى الهالية تُظْهِر خصائص فريدة عندما تعاني تفكك بيتا. فهم راقبوا النواة البوروميونية هيليوم 6، التي تمتلك بروتونين وأربعة نيوترونات. إذ يمكن، عندما تعاني هذه النواة تفكك بيتا، أن يتحول أحد نيوترونات هالتها إلى بروتون. يبقى هذا البروتون عادة مرتبطاً بالنواة، إلا أنه يمكن أن ينضم في الـHe-6 إلى رفيقه نيوترون الهالة ويفلتا على هيئة (دوتيرون) Deuteron.

والأهم من ذلك أن الفيزيائيين يودون دراسة هالات النوى الأثقل. تُركِّز أغلب الأعمال حتى الآن على نواتين هما الـLi-11 ونظير البيريليوم، Be-11، وكلتاهما سهلة الإنتاج والعزل. ويُخَطَّطُ حالياً لبناء تجهيزات جديدة لصنع منظومات أثقل. وقد بدأ العلماء حديثاً باستعمال أجهزتهم المتوافرة حالياً للبحث عن نوى هالية لها كتل تقارب الـ20. ويحلل بعضهم حالياً النواة البوروميونية Be-14. وقد قام العاملون بولاية ميتشيكان بقياس توزعات الاندفاع لنظير الكربون C-19 الذي يحوي سبعة نيوترونات إضافة إلى ما يحويه النظير الأكثر استقراراً، C-12. واكتشف الباحثون في كانل الـC-22، الذي يحوي فوق ذلك ثلاثة نيوترونات أخرى.

ويبدأ الباحثون في الفيزياء النظرية أيضاً في بحث خواص نوى منحنيي الحافة التي تضم في هالتها أكثر من نكلونين. وفي مثل هذه المنظومات تصبح أوجه التزاوج المتعدد الجسيمات ذات شأن خاص وخطير. يمكن أن تكون هذه الهالات أكبر كثيراً من الهالات المشاهدة في الـLi-11، وكلها نوى بوروميونية. ولقد تنبأ بمثل هذه الظاهرة الفيزيائي (ف. إفيموف) (من جامعة واشنطن). وأوضح أنه عندما يكون التفاعل بين جسيمات المنظومة الثلاثية الأجسام على قدر كاف من القوة بحيث يترابط زوج واحد من الجسيمات في كل مرة، فإنه يمكن أن يكون للمنظومة كثير من الحالات الهالية الممتدة والتي لا يُستبعد أن يكون عددها لا نهائياً.

وأخيراً يمكن للبروتونات الضعيفة الارتباط أيضاً أن تكون باعثاً للهالات النووية. وأحسن مثال على ذلك ربما يكون نظير البورون، B-8، الذي يحتوي على بروتون ضعيف الارتباط جداً. وهذا البروتون أقل ارتباطاً حتى من النيوترونات في الـLi-11، وربما تكون هالته غير كروية تماماً. ولاتخاذ قرار بشأن خصائص هالة الـB-8، تقوم فرَق في مختبرات متعددة بقياس توزع اندفاع النواة الموازي.

ويهتم فيزيائيو الفلك على وجه الخصوص بالنواة B-8؛ لأنها تنتج في الشمس بسهولة نيوترينوات سهلة الكشف. ولقد ظهر شذوذ خطير لأن العدد الملاحظ من النيوترينوات الناتج من تفكك B-8 في الشمس أقل كثيراً من العدد المتنبأ به. وإن فهم طبيعة هذه النواة بشكل مضبوط يمكن أن يزودنا تماماً بمفاتيح هذا اللغز. ومن المؤكد أن دراسة النوى قرب منحنيي الحافة ستسفر عن مفاجآت أخرى. ولقد علمتنا الهالات الآن ما لا بأس به عما يجري على الحدود الخارجية للاستقرار.

المؤلفان

S. M. Austin – G. F. Bertsch

كانا زميلين مدة طويلة في جامعة ميتشيكان الحكومية، حيث كانا يدرسان الفيزياء النووية معاً، الأول من الناحية التطبيقية والآخر من الناحية النظرية. حصل أوستن على الدكتوراه من جامعة وسكنسن في سنة 1960، ويعمل في جامعة ميتشيكان الحكومية منذ عام 1965 أستاذاً متميزاً للفيزياء. أما برتش فحصل على الدكتوراه من جامعة برنستن في سنة 1965 وهو حالياً عضو هيئة تدريس الفيزياء بجامعة واشنطن.



ماوراء فيزياء (ميتافيزياء) الجسيمات

(ج. هوركان)(*)

لقد كشف (فارادي) منذ أكثر من 150 عاماً بوساطة سلسلة من التجارب الرائعة أن الكهرباء والمغنطيسية مظهران لقوة واحدة. وقد سعى فارادي، بوحي من هذا النجاح، إلى أن يبرهن أن الكهرطيسية ترتبط، بالمثل، بالثقالة التي وصفها (نيوتن) رياضياتياً قبل ذلك بـــ150 عاماً. وعلى الرغم من فشل فارادي فقد ظل مقتنعاً بوجود مثل هذه النظرية الموحدة.

يشارك العديد من الفيزيائيين المحدثين فارادي إيمانه بأن قوى الطبيعة التي تبدو مختلفة ظاهرياً ما هي إلا أوجه لجوهرة واحدة متناظرة. ولقد حول البحث عن هذا المحك المنشود الفيزياء الحديثة إلى دراما ملحمية تضرب جذورها في الأعماق. يقول (ستيفن واينبرك) (من جامعة تكساس) الحائز جائزة نوبل في كتابه الحديث «أحلامٌ نظرية نهائية»: «إن أي نظرية موحدة ستؤدي إلى ازدهار البحث القديم عن تلك المبادئ التي لا يمكن أن تفسر بوساطة مبادئ أعمق منها». لكن هل يمكن ألا تكون هناك نهاية لهذا البحث عن الضالة المنشودة أبداً؟

لا شك في أن الفيزياء أصبحت أكثر تعقيداً مما كانت عليه أيام فارادي. فقد استعاض (أ. آينشتاين) في بداية هذا القرن عن وصف نيوتن البسيط نسبياً للثقالة النسبية العامة التي لم يَعُدّ فيها الزمان والمكان ثم ما لبث الباحثون أن اكتشفوا قوتين أخريين إضافة إلى الثقالة والكهرطيسية هما: القوة الضعيفة المؤدية إلى أنواع معينة من التفكك النووي، والقوة الشديدة التي تحفظ البروتونات والنيوترونات متماسكة في نوى الذرات.

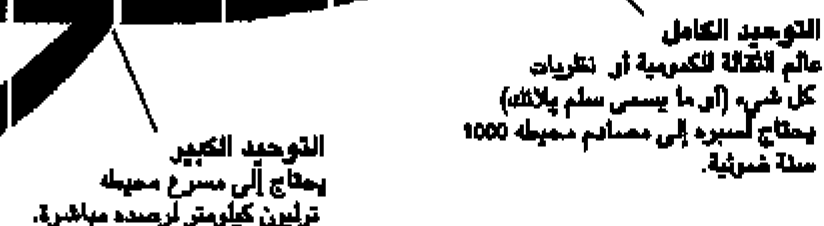
وكان الفيزيائيون، حتى وقت قريب، يتقدمون نحو التوحيد باندفاع شديد. وكانوا قد طوَّروا نظرية ــ أثبتتها المسرِّعات منذ أكثر من عقد من الزمان ــ تصور الكهرطيسية والقوة النووية الضعيفة بأنهما مظهران لقوة واحدة هي (القوة الكهرضعيفة) Electroweak Force. وقد عمد الباحثون ــ بعد أن أخذهم هذا النجاح ــ إلى اختراع ما يسمى (بنظريات التوحيد الكبير) Grand Unified Theories (GUTs) التي تربط القوى الكهرضعيفة بالقوة النووية الشديدة. بل إنهم تقدموا بمشروعات نظريات تضم القوى كلها بما فيها الثقالة. وتدعى هذه النظريات أحياناً نظريات الثقالة الكمومية، لأنها تحاول صهر ميكانيك الكم والنسبية العامة معاً، وهما النظريتان اللتان يشبه مزجهما مزج الزيت والماء. وتعرف هذه النظريات كذلك بنظريات كل شيء لأنها تُعد بتسليط الضوء على المولد الناري للكون حين سادت فترة قصيرة قوة واحدة عليا.



المصادم الفائق ذو الموصلية الفائقة الذي كان ينبغي له أن يكون أكثر قدرة بـــ 20 مرة من أكبر مسرع موجود، وكان يُتوقع أن يكلف 11 بليون دولار. ولو بني لكانت قدرته أقل بكثير من أن تصل إلى المجالات التي يُعتقد أن كل قوى الطبيعة تتحد فيها، وفي الشهر 1993/10، وبعد أن أنفق العاملون بليوني دولار وحفروا خُمس ما كان ينبغي أن يكون نفقاً بيضوياً، طوله 86 كيلومتر في واكاهاشي، بتكساس، ألغى الكونغرس المشروع.

أما الآن، وقد بدا أن الهدف أصبح في متناول اليد، فيواجه الفيزيائيون احتمـــال أن تنتهي رحلتهم قبل بلوغ مقصدها . والسبب

(*) محرر رئيسي بمجلة ساينتفيك أمريكان.



المباشر لهذا القلق هو قرار الكونغرس الأمريكي في الشهر 1993/10 إلغاء بناء (المصادم الفائق ذي الموصلية الفائقة Superconducting Super Collider (SSC) ــ بكلفة 11 بليون دولار ــ وذلك بعد أربع سنوات من بدء العمل في بنائه. ويلاحظ (م.ل. لدرمان) (الذي يعمل في معهد إيلينويز للتقانة، وهو تجريبي حاز جائزة نوبل) أن فيزياء الجسيمات قد تقدمت من خلال قطع مسافات أصغر فأصغر وطاقات أعلى فأعلى، وأن المصادم SSC لو تم بناؤه، لكان أكثر قدرة بعشرين مرة على الأقل من أي مسرع موجود، ولاقترب بالفيزيائيين من التوحيد، ويقول: «أعتقد أن مجال هذه البحوث سينتهي إذا لم نبن المصادم SSC أو شيئاً يماثله». وإذا توقفت فيزياء الجسيمات فيمكن أن تتوقف الكوسمولوجيا (علم الكون) كذلك، وهي التي أصبحت بالتدريج أكثر اعتماداً على نظريات التوحيد في سعيها لإعادة بناء تاريخ الكون.

لكن ربما يكون إلغاء المصادم SSC قد عجّل فقط بوصول الفيزياء إلى طريقها المسدود الحالي. وكثيراً ما انطوت البلاغة التي استخدمت للدفاع عن المصادم SSC على ما يشير إلى أن المصادم كان يمكن أن يفضي إلى نظرية نهائية. ويندرج في هذا السياق عنوان كتاب لدرمان الحديث «الجسيم الإلهي» الذي يدافع فيه بفصاحة عن المصادم SSC. وبالرغم من ذلك يقر لدرمان أن المصادم SSC لو بُني لكان أصغر بعدة مراتب كِبَرٍ مما يلزم لبلوغ الطاقات التي يعتقد أن التوحيد يحدث عندها. إن مسرّعاً من نوع المصادم SSC كان ينبغي أن يكون محيطه ترليون كيلومتر لبلوغ عالم التوحيد الكبير، ويحتاج الضوء لقطع هذه المسافة إلى شهر كامل. أما المصادم القادر على سبر عالم الثقالـة الكمومي البالغ الصغر فينبغي أن يكون محيطـه معادلاً نحو 1000 سنة ضوئية. علماً بأن محيط المنظومة الشمسية كلها هو يوم ضوئي واحد فقط.

وبالفعل قبل أن يوقف مشروع المصادم SSC قال أحد النظريين البارزين من دعاة كبح جماح البحث عن نظرية موحدة: إنها خارج مجال فيزياء الجسيمات. حتى إن (هــ. جورجي) (من جامعة هارفارد) عبّر عن أسفه لكونه قد اقترح واحدة من أولى نظريات التوحيد الكبير منذ نحو 20 عاماً بقوله: «إن تراث التوحيد الكبير، الذي هو بنظري سيئ جداً بالنسبة لمجال فيزياء الجسيمات، هو أن يكون معقولاً ــ بل ودارجاً ــ أن يقضي المرء الذي يعتبر نفسه متخصصاً في فيزياء الجسيمات النظرية كل وقته في تخمينات حول عالم مسافاته أصغر بكثير من اي شيء يمكن أبداً أن ندرسه في المختبر».

وثمة آخرون مازالوا يعتقدون بصحة النظرية. ومن بينهم (ج. إليس) وهو نظري من المركز الأوروبي لفيزياء الجسيمات، المعروف بالأحرف الأولى من التسمية الفرنسية (سيرن) CERN، كان إليس قد أسهم في نشر مصطلحي (التوحيد الكبير) Grand Unification في منتصف السبعينيات و(نظرية كل شيء) Theory of everything بعد ذلك بنحو عقد من الزمن. وهو يؤكد أنه «مازالت توجد آفاق للتقدم في الاتجاهات التقليدية». وهو يلاحظ أن المركز سيرن يعتزم خلال 10 سنوات بناء مسرّع قدرته تماثل تقريباً قدرة المصادم SSC، وحتى ذلك الحين قد تحل معضلات باستخدام تجارب عالية الدقة تُجرى بوساطة المسرعات الموجودة؛ وكذلك بدراسة النيوترينوهات التي تبدو بالرغم من تحفظها في وجود المكثافات ذات أهمية كبرى في العديد من نظريات التوحيد؛

وأيضاً بمشاهدات الخلفية الإشعاعية الكونية التي يعتقد أنها البقية الباقية من حقبة تلت (الانفجار الأعظم) Big Bang مباشرة حين كانت قوى الطبيعة لاتزال متحابكة.

وعلى المدى الأبعد، ربما أتاحت مصادمات مبتكرة، مثل ذلك الذي يدفع الجسيمات على موجة من البلازما، للفيزيائيين أن يختبروا طاقات أعلى بتكلفة أقل. وهناك دائماً إمكانية حدوث تطور رياضياتي أو مفهومي مفاجئ يدفع الباحثين إلى مستوى أعمق من الفهم في غياب المرشد التجريبي. ولكن حتى إليس، الذي يعتبر نفسه متفائلاً بلا حدود، يقر بأنه في المستقبل المنظور «ما لم يأت أحد بفكرة جيدة جداً، أعتقد أننا سنظل نبحث فقط عن البراهين غير المباشرة» على التوحيد. ويقول (أ.ف. ويلتشك) (من معهد الدراسات المتقدمة في برنستون بنيوجرسي) «لقد سعدنا بأننا أنجزنا تقدماً أساسياً، أما آفاق الاستمرار فقد تضاءلت في الحقيقة».

والفيزيائيون، بمعنى ما، هم ضحايا نجاحهم نفسه. فهم قد بنوا نظرية تفسر التأثيرات المتبادلة بين الجسيمات بدقة عالية جداً. هذه النظرية تدعى (النموذج العياري «القياسي») Standard Model (أو تدعى حسب (م. داين) الذي يعمل بجامعة كاليفورنيا في سانتا كروز، «نظرية كل شيء تقريباً»)، وهي تستند إلى أسس ميكانيك الكم المتينة، وهي النظرية الأساسية حول المادة والطاقة التي شادها عمالقة كبار من مثل (ن. بور) و(و. هايزنبرك) و(إ. شرودنكر) خلال العشرينيات والثلاثينيات من هذا القرن. كما ابتكر (ر. فاينمان) وآخرون في الخمسينيات نظرية في الكهرطيسية تدعى الإلكتروديناميك الكمومي تفسر، عملياً، كل الظواهر الكيميائية والإلكترونية.

ثم طور الفيزيائيون، خلال العقد التالي، نظرية القوة النووية الشديدة: الكروموديناميك (التحريك اللوني) الكمومي Quantum Chromodynamics QCD وهي تعتبر البروتونات والنيوترونات مظاهر لجسيمات أولية أبسط تدعى (الكواركات[1]) Quarks. يتألف كل بروتون وكل نيوترون من ثلاثة كواركات يرتبط بعضها ببعض بوساطة جسيمات حاملة القوة تدعى (گلوونات) Gluons، (تشير البادئة (كرومو) Chromo (أي اللون) إلى حقيقة أن الكواركات تصنَّف وفقاً للونها، وهذه خاصية كمومية لا علاقة لها باللون بمعناه العادي).

لقد خطا هذا الفرع خطوة كبيرة نحو التوحيد في الستينيات حين اقترح (س. كلاشو) (من هارفارد) ومحمد عبد السلام (من المركز الدولي للفيزياء النظرية في تريستا) وآخرون، أن الكهرطيسية والقوة النووية الضعيفة هما في الواقع مظهران للقوة الكهرضعيفة نفسها. وقد تم إثبات كل من الكروموديناميك والنظرية الكهرضعيفة بوساطة اختبارات متزايدة في صرامتها في مختبرات (معامل) أكبر مسرّعات في العالم، وهي (مركز المسرع الخطي

[1] الكواركات هي إحدى الأسر الرئيسية للجسيمات الأولية، وهي ذات تفاعلات قوية. ويسمح الميكانيك اللوني (الكروموديناميك) الكمومي Quantum Chromodynamics بوجود نحو 18 نوعاً (نكهة) من هذه الكواركات، منها: الكواركات العلوية، السفلية، المفتونة، الذروية (القمة)، القعرية (القاع) والغريبة. ويرمز إليها على التوالي بـ: u, d, c, t, b و S. وأول من أطلق هذا الاسم على الجسيمات، هو عالم الفيزياء النظرية (كيل ــ مان). ويقال إنه اشتقها من رواية الكاتب الإيرلندي جيمس جويس، الذي كان قد استخدمها ككلمة سر من دون معنى. (المحرر)



الكوارك الذروي هو القطعة الوحيدة في النموذج العياري التي لم يتم اكتشافها بعد دون لبس. وتبين الصورة مرشحاً للكوارك الذروي التقط في مختبر مسرع فرمي القومي عام 1989.

في ستانفورد) Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) ومختبر مسرع فرمي القومي المعروف باسم (فرميلاب Fermilab) في باتافيا بإيلينوي، والمركز سيرن.

لا مجد دون نظريات التوحيد الكبير:

ما إن انتهى المجربون من إثبات النموذج العياري حتى كانوا تواقين لتحطيمه. فقد أعلن (س. روبيا) عام 1983 أن فريقاً يعمل تحت إشرافه في المركز سيرن اكتشف جسيمات Z وW، وهي الجسيمات التي تحمل القوة الكهرضعيفة، واكتشف أيضاً (وحيدات النفثة) Monojets وهي ظاهرة تخرق ــ على ما يبدو ــ النموذج العياري. ويتذكر كلاشو (من هارفارد): «إن المركز سيرن لم يؤكد النموذج العياري فحسب، بل دفنه». وكان روبيا يشغل منصباً في هارفارد إضافة إلى منصبه في المركز سيرن، عندما أعلن عن اكتشافه بهذا الصدد.

لقد حاز روبيا جائزة نوبل مشاركة لاكتشافه جسيماتZ وW، لكن وحيدات النفثة سرعان ما وجد أنها تفسر بالنموذج العياري. ويتفكه كلاشو قائلاً: إن روبيا، عقاباً له على إعلانه المتسرع، أجبر على الإشراف على إثباتات للنموذج العياري تتزايد دقتها باستمرار في المركز سيرن حيث ظل يعمل مديراً له منذ عام 1989 وحتى نهاية عام 1993. ويضيف كلاشو «إن هذا يشبه شيئاً ما مأخوذاً من أسطورة يونانية». ولكن ــ لسوء الحظ ــ كان على باقي فيزياء الجسيمات أن يشارك في نيل عقاب روبيا.

وخلال ذلك كان النظريون قد تخطوا كثيراً النموذج العياري في بحثهم عن نظرية أعمق. وقد شجعهم على ذلك حقيقة أن الكروموديناميك الكمومي والنظرية الكهرضعيفة تعتبران من (النظريات العيارية Gauge Theories) التي تفترض أن عناصر جملة ما يمكن أن تخضع لتحولات ــ كالدوران أو الانعكاس في مرآة ــ دون أن يتغير فيها شيء أساسي. وقد أصبحت هذه الخاصية، المدعوة تناظراً (تماثلاً) Symmetry بالنسبة للعديد من فيزيائيي الجسيمات مثال الحقيقة والجمال.

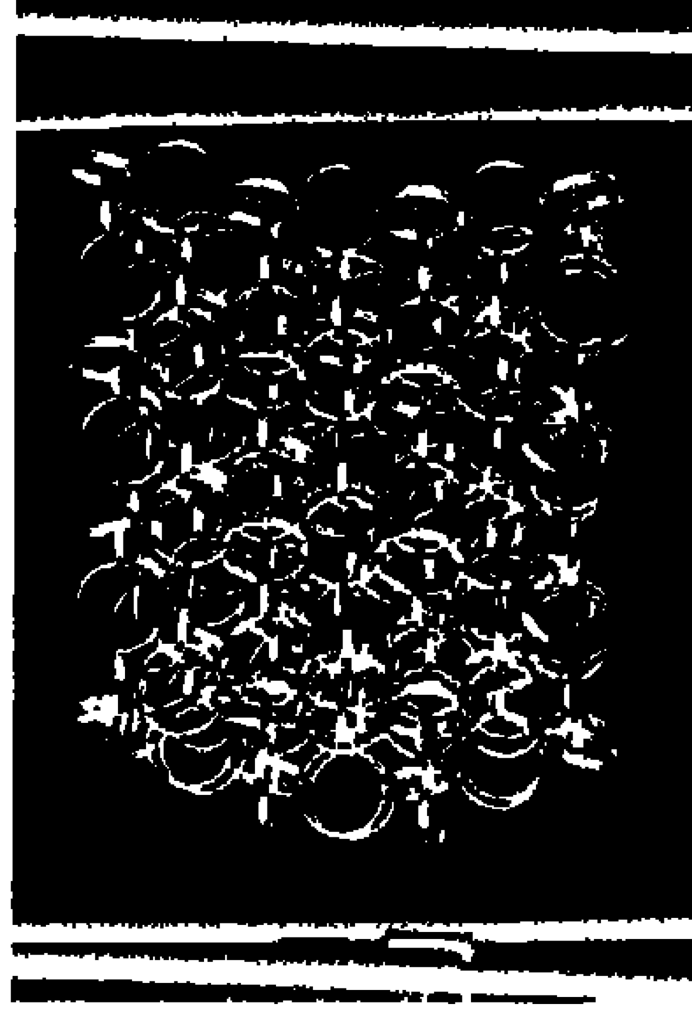
كان كلاشو وزميله الأصغر جورجي (يعمل معه في هارفارد) قد ابتكرا في بداية السبعينيات نظرية عيارية سميت «SU(5)»، يمكن استخلاص التأثيرات المتبادلة الكهرضعيفة والشديدة منها. (يشير المصطلح SU(5) إلى عدد التناظرات التي تكشفها النظرية). أما نظرية التوحيد الكبير ــ وهو مصطلح لم يبتكره كلاشو وجورجي بل يصران على عدم إعجابهما به ــ فقد حققت ما كان يعتبر في ذلك الوقت تنبؤاً يُنطلق منه. فالكواركات يمكن أن تتحول، كما يبدو، إلى نيوترينوهات وإلكترونات ومقابلاتها في المادة المضادة، وهذا يعني أن البروتونات (المؤلفة من كواركات) ليست مستقرة ولا بد في النهاية من أن تتفكك. وعلى الرغم من أن نصف العمر لأي بروتون معين هو أطول من عمر الشمس (وفقاً لحسابات أجراها فيما بعد «واينبرك» وجورجي و«هـ. كوين» من المركز SLAC)، فإن الفيزيائيين تمكنوا من اختبار هذا التنبؤ بوساطة مراقبة عدد كبير من البروتونات.

وقد بُنيت حتى الآن مكشافات تفكك البروتونات في أكثر من ستة مواقع في مختلف أنحاء العالم. ويقع معظمها على عمق كبير تحت الأرض للتقليل من شأن الإشارات الآتية من الأشعة الكونية ــ أي الجسيمات العالية الطاقة الآتية من الفضاء الخارجي. وقد بدأ تشغيل إحدى كبرى التجارب في منجم ملح بالقرب من كليفلاند في أوهايو منذ ما يقارب 10 سنوات. وتتألف التجربة من حوض ضخم (راقود) عملاق مملوء بالماء محاط بمكشافات ضوئية ترقب التوهجات الضوئية الضئيلة التي ينبغي أن تصدر لدى تفكك بروتون ما في الماء. وحتى الآن لم يرصد، هذا المكشاف ولا أي مكشاف آخر، تحلل البروتون.

وما كان من غياب الدعم التجريبي لنظرية SU(5) إلا فتح الباب أمام البدائل، وبالذات لطرق أعم تعرف باسم (التناظر الفائق) Supersymmetry. ويقضي التناظر الفائق أن تشترك الفرميونات ــ وهي الجسيمات المؤلفة للمادة ــ والبوزونات ــ التي تنقل القوى ــ في تناظرات عميقة. ويتطلب هذا المخطط أن يكون لكل جسيم معروف قرين تناظري فائق، أو (Sparticle) كبير الكتلة، وإحدى خواص التناظر الفائق المدهشة هي أنه يمكن زيادة مقدرته لو عُمم على أبعاد إضافية. وتماماً كما يدرك رائد الفضاء تناظر الكرة الأرضية حين يرتفع عالياً فوق سطحها ذي البعدين كذلك يستطيع النظريون تبيُن التناظرات الدقيقة ــ التي تحكم التأثيرات المتبادلة بين الجسيمات ــ بوساطة النظر إليها من وجهة نظر ذات عدد أكبر من الأبعاد.

هل تحتاج فيزياء الجسيمات إلى مثال جديد؟

على الرغم من أنه يصعب فهم نظرية الأوتار الفائقة ويصعب التعامل معها، فإنها بلا جدال المرشح الرئيسي لنظرية ثقالة كمومية. وربما كان أحد أسباب ذلك أنها تمثل امتداد لأفكار، مثل التناظر، متأصلة بعمق في مراحل تقدم فيزياء الجسيمات. لكن بعض النظريين يعتقدون أنه آن الأوان للنظر في طرق جديدة وقد ظهر مخطط مبتكر للثقالة الكمومية خلال السنوات الست الماضية لدى مجموعة من المختصين في النسبية العامة، وتدعى (نظرية الفضاء الحَلَقي) Loop – Space Theory أو نظرية أشتكار باسم أحد مبتدعيها (Abhay Ashtekar) (من جامعة سيراكوز). وقد وجد أشتكار طريقة لإعادة كتابة معادلات النسبية العامة بحيث تكون شبيهة بمعادلات الإلكتروديناميك الكمومي.



ويتيح لهم هذا الأسلوب معاملة الثقالة كظاهرة كمومية من دون مواجهة المشكلات الرياضياتية التي أوقفت المحاولات الأخرى. وأحد مقتضيـــات النظرية هو أن الفضاء ليس كياناً دون تغضنات أو شقوق، وإنما هو مؤلف، مثل لوح من درع ذات زرد، من حلقات منفصلة متناهية في الصغر.

وهناك مفهوم مختلف جذرياً أكثر من سابقه كان قد تقدم به (ج. هوفت) (من جامعة أترخت في هولندا). وكان هوفت قد قام بدور رئيسي في تطوير (النظريات العيارية) Gauge Theories، التي هي اللغة التي يُكتب بها النموذج العياري (القياسي). ومع ذلك غدا بشكل متزايد غير راض عن المقاربات للثقالة الكمومية التي يشعر بأنها تعطي أهمية قليلة لمفاهيم أساسية مثل السببية.

ويقترح أن يحاول الفيزيائيون بناء نماذج فيزيائية تعتمد (الآلات أوتوماتيكية خلوية) Cellular Automata، وعلى مبتدعات علم الحاسوب التي تشكل السببية صفة أساسية من صفاتها. تتألف الآلة الأوتوماتيكية الخلوية من شبكة من الوحدات المنفصلة، أو الخلايا، التي تتطور وفقاً لقواعد معينة لتعيين حالة كل خلية بوساطة حالات جاراتها المباشرة.

وهناك فيزيائي شهير آخر يدافع عن أساليب جديدة في التفكير هو (ر. بنروز) (من جامعة أكسفورد) وهو يرتاب في افتراض معظم فيزيائيي الجسيمات حول كون التناظر صفة أساسية من صفات الطبيعة أكثر مما يرتاب في نظرياتهم. ويؤكد بنروز أن هذا الاعتقاد يستند في النهاية إلى خيار جمالي، وهو خيار لا يشارك هو وفيزيائيون آخرون بالضرورة فيه.

وكتب بنروز في مقالة حديثة: «في رأيي لو حدث أن أوجدت نظرية نهائية لما أمكن أن تكون إلا مخططاً ذا طبيعة مختلفة جداً. فبدلاً من أن تكون نظرية فيزيائية بالمعنى العادي، لا بد أن تكون مبدأ رياضياتياً قد يتطلب تنفيذه رهافة لا تقانية».

لقد وضع النظريون نظريات مختلفة للتوحيد الكبير الفائق التناظر وقد وضعوا أيضاً نظريات ثقالة كمومية. وكمثال على هذه الأخيرة نظرية (الثقالة الفائقة) Supergravity التي تفترض أن (الكرافيتونات) Gravitons، وهي الجسيمات الحاملة للثقالة، لها أقران فائقة التناظر يدعى الواحد منها (كرافيتينو) Gravitino. وفي عام 1980، كان يبدو أن الثقالة الفائقة واعدة لدرجة أن (و.س. هوكنك) (من جامعة كامبردج) أعلن أنها قد تمثل «النظرية الكاملة والموحدة للفيزياء» التي طال البحث عنها. لكن سرعان ما غاصت الثقالة الفائقة في مستنقع المشكلات الرياضياتية المتعلقة بتعريف الكرافيتون كنقطة. وتماماً كما أن التقسيم على الصفر يؤدي إلى لا نهاية، أي إلى نتيجة لا معنى لها، كذلك شأن الحسابات التي تتضمن جسيمات نقطية. لقد ساعدت النظريات العيارية الفيزيائيين ــ الذين يبنون نماذج للكهرطيسية وللقوى النووية ــ في التغلب على هذه المشكلة. لكن يبدو أن الثقالة، وما تسببه من تشويه للزمان والمكان، تحتاج إلى طرق معالجة مختلفة جذرياً.

ويعتقد الكثير من الفيزيائيين أن نظرية الأوتار الفائقة تمثل طريقة المعالجة المطلوبة، وهذه النظرية بدأت بداية متواضعة. ففي بداية السبعينيات اقترح النظريون أن القوة النووية الشديدة يمكن أن تنشأ عن تأثيرات متبادلة بين جسيمات لها شكل الأثار. فكما تُصدر اهتزازات أوتار الكمان نغمات مختلفة كذلك يمكن أن تعطي اهتزازات تلك الأوتار جسيمات متباينة تتضمنها القوة الشديدة.

وقد هُجر هذا الطريق فيما بعد لصالح الطريقة الأكثر نجاحاً التي تستخدم الكواركات والكلونات، بيد أن نظرية الأوتار بُعثت مرة أخرى في شكل تناظري فائق في أواخر السبعينيات على يد (ب.م. كرين) (من كلية الملكة ماري في لندن) و(هــ.ج. شفارتز) (من معهد كاليفورنيا للتقانة). وقد وجد كرين وشفارتز، وهذا ما أثار دهشتهما بعض الشيء، أن كل قوى الطبيعة، بما فيها الثقالة، تنتج من الأوتار الفائقة التناظر. وأفضل من ذلك كله أن استبدال الأوتار بالنقاط يزيل العديد من الصعوبات الرياضياتية التي تنشأ في نظريات الثقالة الكمومية الأخرى.

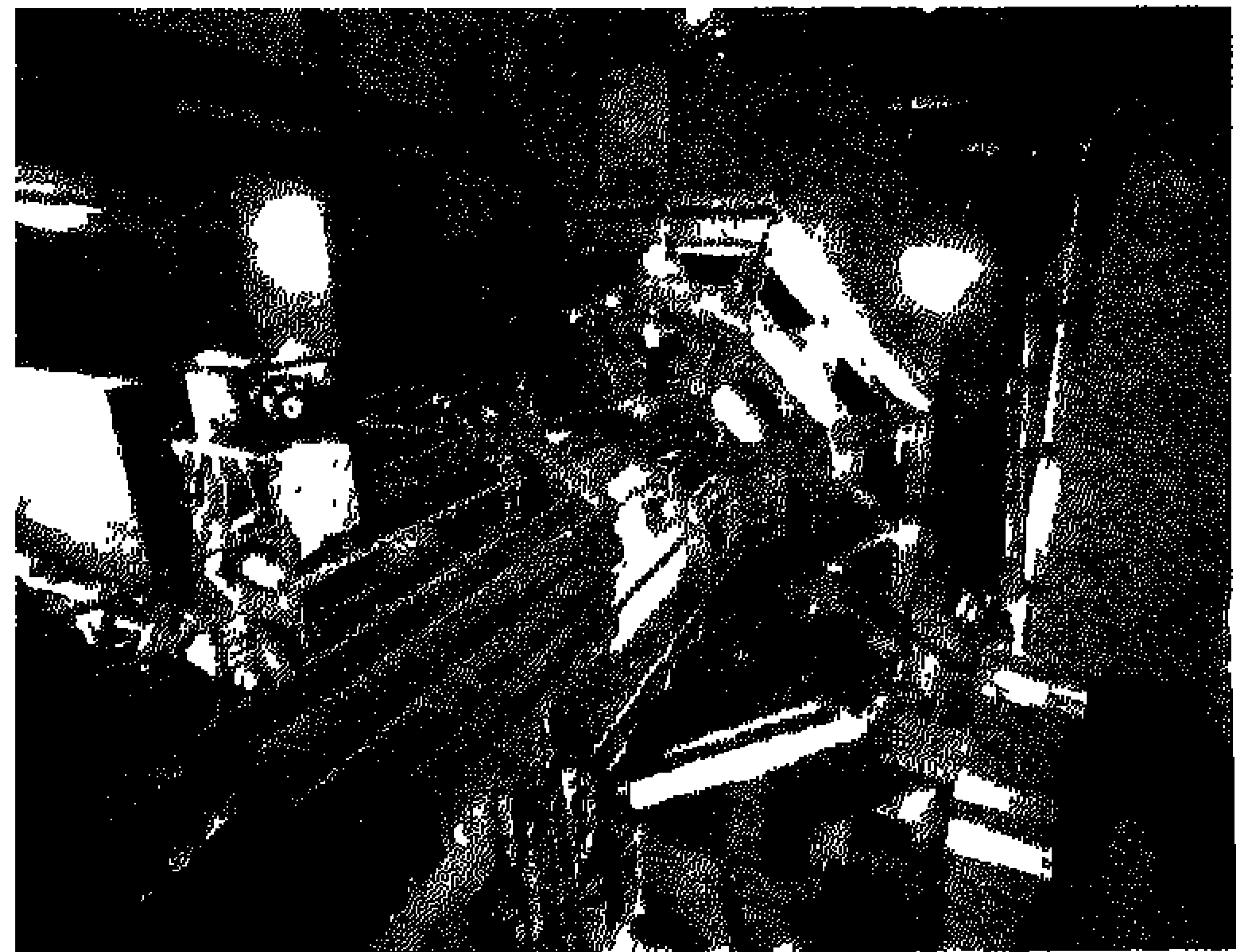
تتطلب هذه النظرية قبول فرضيات حول الواقع الفيزيائي ذات شطط كبير. إذ يُعتقد أن الأوتار تتضمن عدداً من الأبعاد يبلغ 26 بعداً، وأنها من الصغر بحيث إذا قورنت بالبروتون كانت أصغر منه بقدر ما هو نفسه أصغر من المنظومة الشمسية. وهذا العالم المكروي (الصغري)، المسمى سلّم (مقياس) بلانك، ينأى عن أي تجربة يمكن تخيلها. وعلى الرغم من ذلك فقد أصبح الفيزيائيون، ثم الرياضياتيون كذلك، مبتهجين بالبنية الغنية لهذه النظرية. وفي الحقيقة فإن (إ. وتّن) (من معهد الدراسة المتقدمة). وهو نظري في

الأوتار الفائقة من الدرجة الأولى، قد صار ذا تأثير فعال في الرياضيات كما في الفيزياء.

ومع ذلك حتى وتّن نفسه، ذو المهارات التحليلية الأسطورية، كافح في سبيل ربط الأوتار الفائقة بظواهر فيزيائية معروفة. وقد أقام حديثاً جسراً بين الأوتار الفائقة والثقوب السوداء التي كانت عادة ملعب النظريين المتخصصين في النسبية العامة وليس في فيزياء الجسيمات. وقد بيّن وتّن عام 1991 كيف يمكن للنظرية الأوتار الفائقة أن تنتج ثقوباً سوداء ــ وإن تكن مبسطة جداً ــ ذات بعدين فقط. وقد أثارت نشرة وتن نشاطاً نظرياً قوياً مازال مستمراً حتى اليوم.

قد تساعد الأوتار الفائقة كذلك في وضع حد لمشكلة محيرة تتعلق بالثقوب السوداء كان قد أشار إليها هوكنك منذ عقدين فقد بين هوكنك أن الثقوب السوداء يمكن أن تشع طاقة ــ وإذاً كتلة ــ بسبب التأثيرات الكمومية، وأن يستمر ذلك حتى تتبخر في النهاية. ولقد لخص اكتشافه بعبارة واحدة «الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً». ولأن الثقب الأسود يمثل، من حيث المبدأ على الأقل، سجلاً للعمليات التي أوجدته، فإن تبخره يؤدي إلى فقد دائم في المعلومات. أي إن الماضي، بمعنى ما، يُمحى. وقد أعلن هوكنك، ووافقه العديد من النظريين، أنه اكتشف مفارقة لا يمكن حلها إلا بتغيير ميكانيك الكم أو النسبية العامة.

لقد بيّن (ل. سسكند) (من جامعة ستانفورد) في مقالة نشرت بمجلة Physical Review Letters في الشهر 1993/10 كيف يمكن للأوتار الفائقة أن تحل الأحجية. كما بيّن سسكند أن المفارقة التي وجدها هوكنك تنشأ عن الفرضية التي تتضمنها النسبية العامة حول تكوّن الصورة نفسها لدى مختلف المراقبين عن كيفية تخزين المعلومات في منطقة معينة من المكان والزمان، أما حسب نظرية الأوتار الفائقة فيمكن أن تتكون صور مختلفة لدى المراقبين ويكون الماضي محفوظاً بالنسبة لأي مراقب فرد.



يمثل المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات بالقرب من جنيف، المسمى سيرن، أفضل أمل لفيزيائيي الجسيمات بعد أن توقف مشروع المصادم SSC. ويأمل المسؤولون هناك أن يبنوا، خلال العقد القادم، أكثر المسرعات قدرة في العالم، مصادم الهادرونات الكبير، في النفق الذي طوله 27 كيلومتر والذي يحوي الآن مصادم الإلكترونات والبوزترونات الكبير (LEP).

تُوجَّه الانتقادات إلى مثل هذا العمل بصفته لا يمت للفيزياء بصلة لأنه بعيد كل البعد عن أي ظواهر يمكن أن تُحقَّق تجريبياً. أما ردّ سسكند على ذلك فهو أنه لا يمكن أن يتم التقدم في الفيزياء بعد الآن بالطرق التقليدية. ويصرح قائلاً: «من الواضح تماماً بالنسبة لي أنه لو وجب حل المسائل التي برزت على امتداد فترة الـ15 أو20 عاماً الماضية لما كان ذلك من خلال تجارب تجرى في خطوات متزايدة، ولكان من غير المأمول الحصول على سلم بلانك بهذه الطريقة. والذين يجهلون هذا ستنقطع ــ ببساطة ــ صلتهم بالموضوع». ويعبر وتّن عن وجهة النظر نفسها ولكن بطريقة ألطف فيقول: «أعتقد أن عملنا سيكون أفضل كثيراً، لو تحقق تجريبياً، لكنني أؤمن بالدأب الإنساني».

البحث اليائس عن البيانات:

ومع ذلك يلتمس معظم النظريين بعض الإشارات الخفية من التجارب علها تدلهم على أنهم على الطريق الصحيح. فبعضهم عقد الأمل على إيجاد دليل مؤقت على التناظر الفائق الذي هو اختبار لازم لكنه غير كاف للأوتار الفائقة. وقد حاول كل من مختبر فرمي والمركز سيرن ــ دون جدوى ــ الكشف عن وجود جسيمات فائقة التناظر.

ويدعي بعض العاملين أن المركز سيرن قدم ما يمكن أن يعتبر دليلاً غير نهائي على التناظر الفائق. فقد أجرى الباحثون هناك قياسات دقيقة للغاية لما يدعى (ثوابت الاقتران) Coupling Constants للكهرطيسية وللقوتين الضعيفة والشديدة. (ثابت الاقتران لقوة ما هو مقياس لشدتها). وتتنبأ نظريات التوحيد الكبير بأن ثوابت الاقتران للقوى الثلاث القصيرة المدى، التي لها قيم مختلفة عند الطاقات المنخفضة، يجب أن تتقارب عند الطاقات العالية. لكن بيانات المركز سيرن تتعارض مع تنبؤات نظرية التوحيد الكبير القديمة SU(5)، أما حين يضاف التناظر الفائق إلى النظرية فإن البيانات تتفق «تماماً» حسب ما يقول إليس الذي يعمل في المركز سيرن.

لكن الأخرين يجدون هذه النتائج غير مقنعة. ويقول (أ. دي روجولا) (وهو نظري آخر من المركز سيرن): «حتى الآن لن أقفز من الفرح». ويلاحظ أن القياسات التي أجريت في المركز سيرن لا تدعم التناظر الفائق إلا إذا تم الاستقرار لمدى عدة مراتب كبر. وفي الحقيقة يرى دي روجولا ــ بسبب ندرة البراهين ــ أن بعض زملائه مفتونون، بعض الشيء ــ أكثر من اللازم بالتناظر الفائق. وببرود يضيف قائلاً: «إن التشابه اللفظي (في الإنكليزية) بين التناظر الفائق Supersymmetry والوهم Superstition ذو الدلالة».

وهناك تجارب أخرى متنوعة قد تنير الطريق قريباً لما بعد النموذج العياري. فلا يزال مختبر فرمي يبحث عن (الكوارك

الذروي) Top Quark، وهو الجسيم الوحيد الذي تنبأ به النموذج العياري ولم يتم اقتناصه بعد. وربما أدى الفشل المستمر في إيجاد الكوارك الذروي إلى تناقض مع النموذج العياري، ومن ثم سيعتبر صيد الكوارك الذروي في مختبر فرمي «فتحاً علمياً كبيراً» كما يلاحظ (ن.ج. بنلوخ). ومع ذلك ربما كان العاملون هناك قد لمحوا هذا الجسيم في المجال المتوقع. ويستبق معظم المراقبين الأمور قائلين: إنهم سيعلنون قريباً عن اكتشافه.

يخطط كل من مختبر فرمي والمركز سيرن لتطوير مسرعاتهما الرئيسية. إذ يأمل مختبر فرمي بزيادة كثافة حزمة (التيفاترون) Tevatron — الذي يدفع، بقوة، البروتونات والبروتونات المضادة بعضها تجاه بعض. أما المركز سيرن فينوي مضاعفة قدرة (مصادم الإلكترونات والبوزوترونات الكبير) Large Electron – Positron (LEP) Collider. وستعطي هذه الآلات العاملين فرصة أخرى — وإن كانت ضعيفة — لإيجاد جسيمات فائقة التناظر. حتى إن لديهم حظاً أبعد منالاً لإيجاد بوزون (هيكز). ويعتقد النظريون أن هذا الجسيم يمكن أن يقوم بدور حاسم في كسر التناظر أو في فك الكهرطيسية والقوة الضعيفة عند الطاقات العالية. ويمكن لبوزون هيكز أن يوضح لنا كيفية تملك الجسيمات مثل هذا المدى الواسع من الكتل التي تبدو وكأنها اعتباطية.

يمكن للمسرعات أن تشغل النظريين كذلك بدراسة الميزونات؛ هي الجسيمات ذات الأعمار القصيرة جداً والمؤلفة من كوارك وكوارك مضاد. وقد أدت التجارب على ما يسمى ميزونات K، أو (كاؤونات) Kaons، في الستينيات إلى اكتشاف أن المادة والمادة المضادة ليست إحداهما صورة مرآتية للأخرى وإنما تتمتعان، بدلاً من ذلك، بعدم تناظر رهيف. وقد ذهب بعض النظريين إلى التفكير بأن الكون ما كان ليوجد لولا عدم التناظر هذا، المسمى (انتهاك الشحنة والمماثلة) Charge – Parity Violation، لأنه لولاه لنتجت من الانفجار الأعظم كميات متساوية تماماً من المادة والمادة المضادة، اللتين تفني إحداهما الأخرى عند التقائهما.

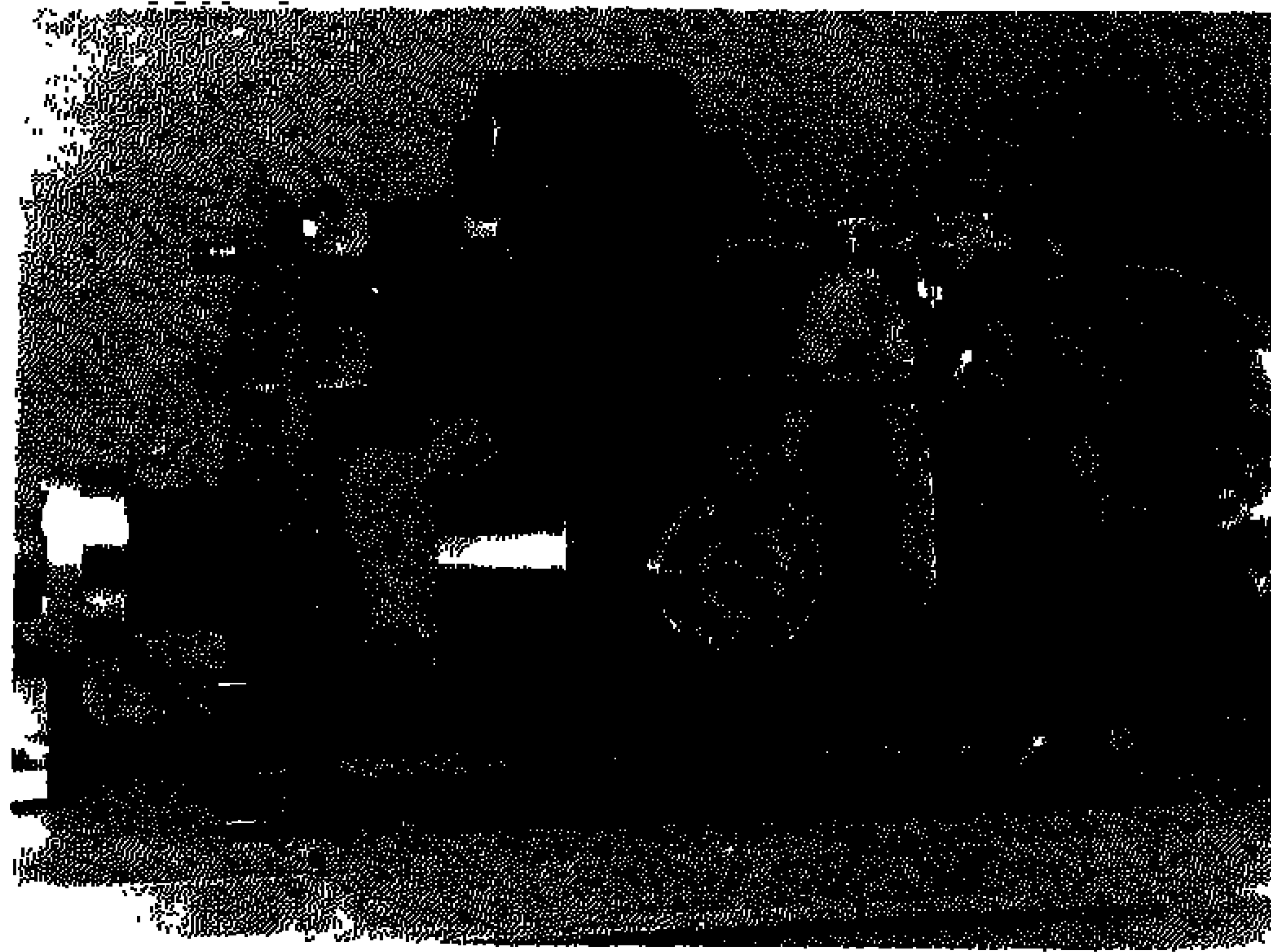
ويأمل الفيزيائيون بالتحقق من هذه الأفكار بوساطة تجارب تجرى على ميزونات B، وهي الجسيمات التي يتوقع أن تبدي انتهاك الشحنة والمماثلة أكثر من ميزونات K. وفي الخريف الماضي سمح مشروع القانون نفسه الذي قضى على المصادم SSC ببناء منشأة لتوليد كميات وافرة من ميزونات B في المركز SLAC بمبلغ 237 مليون دولار. و«معمل B» هذا يمكن أن يعطي نتائج تُخلُّ بالنموذج العياري الذي لايسمح بانتهاك الشحنة والمماثلة إلا ضمن وسطاء معينة.

لكن الفعالية ليست كلها في مختبرات المسرعات. فالنتائج ذات المعنى الكوني يمكن أن تبرز من مراصد النيوترينو. ولا يغير وصف النيوترينوهات بأنها «مراوغة»— لأنها نادراً ما تتفاعل مع المادة العادية ويصعب لذلك كشفها — من أنها تقوم بدور حاسم في التأثيرات المتبادلة الكهرضعيفة وفي النظريات الكوسمولوجية. وقد وجدت بعض المكشافات تحت الأرضية — التي بدأت تعمل في السبعينيات، والتي بني بعضها أصلاً لكشف تفكك البروتونات — أن الشمس تصدر كمية من النيوترينوهات أقل مما يمكن توقعه من النموذج العياري.

وقد تأكد نقص النيوترينوهات الشمسية بوساطة مكشافين جديدين، مركبين تحت الأرض كذلك لحذف الإشارات من الأشعة الكونية، وهما يراصدان النيوترينوهات في مركبات الكاليوم بدلاً من أحواض السوائل، وذلك من خلال التجربتين: (تجربة الكاليوم السوفييتية — الأمريكية) Soviet – American Gallium Experiment (SAGE) التي أجريت في مرصد مدفون تحت أحد جبال القفقاس الروسية، و(تجربة الكاليوم) Gallium Experiment (GLLEX)، وقد أجريت في مختبر كران ساسو في جبال أبينين الإيطالية.

وأحد تفسيرات النقص هو أن النيوترينوهات «تتذبذب» بين أنواع مختلفة، متحولة من نيوترينوهات إلكترونية إلى أشكال أخرى كشفها أصعب. وهذا ما يدعى الحدس MSW نسبة إلى أصحابه (ب.س. ميخييف) و(ي.أ. سميرنوف) (من جامعة موسكو) و(ل. ليفينشتاين) (من جامعة كارنيكي ميلون). ويمكن لهذه الذبذبات أن تحدث فقط إذا كانت للنيوترينوهات كتلة، وهذه نتيجة تناقض الشكل الصارم للنموذج العياري.

يقر (ن.ج. باهكول) (من معهد الدراسة المتقدمة)، وهو مرجع في النيوترينوهات، أنه يمكن تعديل النموذج العياري ليستوعب النيوترينوهات المتذبذبة ذات الكتلة. ومن ناحية أخرى فإن القيم المرصودة حتى الآن تقع كلها ضمن المجالات التي تتنبأ بها نظريات التوحيد الكبير بما في ذلك تلك التي تتضمن التناظر الفائق. ويضيف باهكول بأن هناك دراسات تفصيلية أخرى «يمكن أن تستخدم كاختبار لمعرفة الأفكار الصحيحة في نظريات التوحيـد



ومضات الحزمة الإلكترونية خلال حجرة البلازما لإيضاح تقنية التسريع بوساطة أثر الحقل في مختبر أرگون القومي.

الكبير». فإذا تأكد أن للنيوترينوهات كتلة جعلها ذلك مرشحة لأن تكون هي المادة «المظلمة» أو «المفقودة» التي يعتقد معظم الكوسمولوجيين أنها تعم الكون. ويجب أن يتم الحصول على المزيد من المعلومات خلال السنوات القليلة المقبلة حين تبدأ مراصد النيوترينو البالغة الحساسية عملها في اليابان وكندا. وفي الوقت ذاته فإن التجارب التي أساسها المسرعات ــ بما في ذلك اثنتين في المركز سيرن وأخرى في مختبر كران ساسو ــ ستحاول تعيين كتل النيوترينوهات.

ويحذّر واينبرك من الثقة الزائدة في أن أياً من هذه التجارب يمكن أن تؤدي إلى فيزياء جديدة جذرياً: «توجد طرق مختلفة يمكن أن يحالفنا الحظ بها خلال السنوات الخمس أو العشر المقبلة، ولكن ها قد مضى علينا ونحن نقول ذلك حتى الآن 10 أو 15 سنة»، وكلاشو أيضاً متشائم مثله. وهو يشك في أن تكون تجارب الطاقات المنخفضة قادرة مرة أخرى على الكشف عن ظواهر تنتهك النموذج العياري، وهو يشير إلى أنه سبق أن وجدت ادعاءات عديدة حول مثل هذه الظواهر في السنوات الأخيرة ــ متضمنة «قوة خامسة» جديدة تماماً من قوى الطبيعة تعاكس الثقالة؛ وكذلك نيوترينوهات ثقيلة جداً (17000 إلكترون فلط) و(وحيدات قطب) Monopoles، وهي جسيمات فريدة لها قطب مغنطيسي وحيد. لكن أياً من هذا كله لم يثبت.

ويقول كلاشو: «إن السؤال الذي أفكر فيه هو كيف نحافظ على مؤسسة الطاقة العالية» حتى يتم بناء المسرع الكبير التالي. ويضيف «سيعمل الناس أشياء مضجرة ولن يعترف أحد بأن ما يعملونه مضجر، لكنه سيبقى مع ذلك مضجراً».

ويؤكد واينبرك وكلاشو أن المصادم الفائق ذا الموصلية الفائقة كان يمثل أفضل سبيل يمكن سلوكه نحو فيزياء جديدة مثيرة. وكان المصادم SSC يسوّق غالباً على أنه آلة يمكن أن تكشف بوزون هيكز: لكن، كما يلاحظ عالم المركز سيرن النظري دي روجولا، فإن اكتشاف بوزون هيكز لن يفتح بالضرورة مجال الفيزياء واسعاً، ففي حين سيكون مثل هذا الاكتشاف تأكيداً حاسماً للنظرية الكهرضعيفة، فهو لن يمثل بحد ذاته سوى امتداد للنموذج العياري. ويضيف قائلاً: «لقد كُتبت الكتب حول ذلك. فمن المحتمل ألا تُفتح نافذة تؤدي إلى أي شيء جديد».

أما التناظر الفائق فكان يمثل هدفاً أهم بكثير للمصادم SSC حسب (ج.د. كروس) (من جامعة برنستون) والذي قام بدور هام في تطوير الكرموديناميك الكمومي، وهو الآن مدافع بارز عن الأوتار الفائقة، يقول كروس: «كان يمكن للتناظر الفائق أن يكون اكتشافاً رئيسياً، شأنه شأن أي اكتشاف رئيسي في هذا القرن. وكان يمكن أن يوسع نظرتنا إلى الزمان والمكان. وأن يبرهن على وجود أبعاد أخرى». أما (ب.ج. برسكل) (من كالتك)، فمازال لديه أمل آخر هو أن المصادم SSC كان يمكن أن يجد شيئاً ما غير متوقع إطلاقاً، ويقول «لقد كان ذلك ما لزم أن يكون لبث الحياة في فيزياء الجسيمات».

أما الآن، وقد ولّى المصادم SSC، فإن الفيزيائيين يأملون بأن يجدوا وسيلة خلاص من خلال (مصادم الهادرونات الكبير) Large Hadron Collider (LHC)، وهو محطّم بروتونات مشابه إنما أصغر، يمكن أن يُبنى في المركز سيرن. وكان المركز سيرن قد رغب مرة في بناء المصادم LHC قبل المصادم الفائق، وربما يكون هو الأول في اكتشاف بوزون هيكز. والميزة الأساسية في المصادم LHC هي أنه سيبنى في نفق موجود مسبقاً طولــه 27 كيلومتر، وهو النفق الذي يضم الآن المصادم LEP. ويقدر الرسميون في المركز سيرن أن مصادم للهادرونات الكبير يمكن أن يبنى بمبلغ لا يتجاوز 3 بلايين دولار، أي بأقل من ثلث الكلفة التقديرية للمصادم SSC.

كان بعض المراقبين قد عبّروا عن قلقهم من أن المجموعة الأوروبية يمكن أن تحذو حذو الكونغرس الأمريكي وتلغي، أو تؤجل إلى أجل غير مسمى، بناء المصادم LHC. إلا أن (ل.س. سميث) الذي خلف روبيا في إدارة المركز سيرن في الشهر 1994/1 واثق من أن المصادم LHC سيُبنى وسيعمل في وقت ما من أوائل القرن المقبل. ويقول «لقد كنت واثقاً على أي حال، أما الآن فيجب حتماً أن نسير إلى الأمام، لأنه سيكون فريداً». وفي حين يعترف بأن بعض أعضاء المركز سيرن يخشون «من ضياع أصواتهم» إذا قررت الولايات المتحدة أن تسهم في مشروع المصادم LHC، إلا أنه يؤكد أن «لدينا التزامات بأن نجد طريقة» لجعل الفيزيائيين الأمريكيين يشاركون فيه.

يتوقع سميث أن يشغّل المركز سيرن المصادم LEP خلال نهاية هذا القرن وأن يتبعه مصادم الهادرونات الكبير بحلول عام 2003. وسيتيح هذا الجدول الزمني للفيزيائيين أن يستثمروا المصادم LEP بشكل كامل وأن يصمموا المصادم LHC بعناية. ويقول سميث: إن هناك خطراً على حيوية المجال إذا ما تركنا الموعد يبتعد أكثر، ويضيف: «لا يمكنك أن تبدأ تجربة وتتوقع أن ينهيها أحفادك».

ليس هناك ضمان بأن المصادم LHC سيُبنى ــ أو أنه سينجح، وكان الفيزيائيون الأمريكيون قبل القضاء على المصادم SSC في النهاية مولعين بالإشارة إلى أنه بالرغم من أن المصادم LHC أرخص من المصادم SSC فإنه مشروع يحمل مجازفة أكبر. وبما أن مدى الطاقة في المصادم LHC ليس سوى ثلث تلك التي للمصادم SSC، فإنه ستكون لديه فرصة أقل لإيجاد بوزون هيكز أو جسيمات فائقة التناظر ــ أو بعض الظواهر غير المتوقعة. فضلاً عن ذلك لا بد من أجل الوصول إلى مدى الطاقة تلك في نفقه الصغير نسبياً من دفع تقانة المغانط الفائقة التوصيل إلى أبعد حدودها. ومع ذلك فإن الفيزيائيين الأمريكيين يؤيدون الآلة التي كانوا سابقاً ينتقدونها. ويعلق واينبرك قائلاً: إن المصادم LHC يمثل «أفضل آمالنا الآن».

أزمة الفيزياء عام 1904

هل تمثل حالة الفيزياء الظلمة قبل الفجر؟ غالباً ما يلجأ الفيزيائيون المحدثون وهم يبحثون عن دعم لوجهة النظر هذه إلى تاريخ مجالهم، الذي يقدم أمثلة عديدة عن الأزمات التي تم تخطيها في آخر الأمر.

ولعل أكثر هذه الفترات خطورة كانت في بداية هذا القرن. إذ إن اكتشافات الأشعة السينية والإلكترونات والبروتونات والأشكال الأخرى من الإشعاع الصادر عن الذرات أتعبت الفيزياء الكلاسيكية إلى حد قصمها. وكذلك فعلت التجارب على الضوء التي طرحت مسائل لم تتمكن مفاهيم الحس السليم حول المكان والزمان من حلها.

وقد اجتمع عام 1904 عدد من أشهر فيزيائيي العالم في مؤتمر الفنون والعلوم في سانت لويس بمونتانا لمناقشة مأزق الفيزياء. وقام في هذا اللقاء كل من (إرنست رذرفورد) و(هنري بوانكاريه) و(لودفيك بولتزمان) وعلماء آخرون برسم خطوط المأزق الذي كانوا يواجهونه واقترحوا الحلول الممكنة له. وقد قام (ن.س. يانك) (من جامعة ولاية نيويورك في ستوني بروك) بقراءة هذه الخطب التي طبعها معهد الفيزياء الأمريكي عام 1986 كالجزء الخامس من سلسلة تاريخ الفيزياء الحديثة. ويلاحظ يانك ــ الذي حصل على جائزة نوبل لعام 1957 بالمشاركة لكونه اقترح تجربة، تؤكد وجود تناظر رهيف، (اليدوية) Handedness في تفاعلات معينة بين الجسيمات ــ «لقد فجعوا لأن كل شيء اعتقدوا أنهم قد فهموه كان خطأ».

وبعد بضعة أشهر فقط صاغ ألبرت أينشتاين نظريته النسبية الخاصة، التي حلت المفارقات التي أثارها انتشار الضوء، وذلك بوساطة مفاهيم جديدة جذرياً حول الزمان والمكان. وبعد 20 عاماً طور الفيزيائيون ميكانيك الكم الذي وفر وصفاً غريباً، لكنه دقيق لدرجة مدهشة، لسلوك الذرات.

لكن يانك يحذر من أن أزمة عام 1904 تختلف كثيراً عن الأزمة الحالية. فقد نشأ التضارب آنذاك عن عدم مقدرة الأفكار السائدة مسبقاً على تفسير النتائج التجريبية. ويؤكد يانك «أن هذا النوع من التعارض جيد، أما الآن فنحن في نوع مختلف من المشكلات». ومع أن النسبية العامة والنظريات الكمومية متعارضة ظاهرياً فإنه لا توجد أي تجربة ــ يمكن تصورها ــ بإمكانها التوجه مباشرة إلى هذا التعارض.

ويعلق يانك: «هناك القليل جداً من التجارب» التي يمكنها تحقيق تقدم ملحوظ، أما «من دون التحقق فيكون الأمر كالرمي في الظلام». ويمكن لهذا المجال أن يتقدم أيضاً من خلال بعض التقدم الكبير في الرياضيات، لكن يانك يلاحظ أن مثل هذا التقدم كان، عبر التاريخ، نادراً جداً. وعلى أي حال لا يحتمل حدوث أي من الأمرين خلال الأعوام العشرين المقبلة. ومجال فيزياء الجسيمات، كما يقول يانك، «في مشكلة، بل ومشكلة كبيرة».

التزلج على أمواج البلازما:

يأمل بعض العاملين، لا سيما أولئك الذين يتفكرون في الثقالة الكمومية، أن يتقدم مجال عملهم من خلال تقدم نظري درامي، وهذا يؤدي إلى فهم أعمق للظواهر التي يمكن التوصل إليها تجريبياً. ويقول وتّن: إن الفيزياء يمكن أن تقفز إلى الأمام حين يكتشف الباحثون ما أسمّيه «المبادئ الهندسية الجوهرية» الموجودة في أساس نظرية الأوتار الفائقة. ويضيف زميله كروس المتحمس للأوتار: «لدي مخططات تخيلية ننجح فيه دون معطيات تجريبية».

ولكن حتى (ر.س. كولمان) (من هارفارد) ــ الشهير بعمله حول مثل تلك الظواهر التأملية جداً مثل (العوالم المتوازية) Parallel Universes و(الثقوب الدودية) Wormholes، التي هي تمزقات في نسيج المكان والزمان ــ يجد مثل تلك المخططات بعيدة الاحتمال. ويقول: «إن التجربة هي مصدر الإبداع العلمي. فلم يكن بمقدور كل فلاسفة العالم ولو فكروا آلاف السنين أن يتوصلوا إلى ميكانيك الكم».

ويوافق على هذا الرأي (س.س. تينك) وهو أستاذ في معهد ماساتشوستس للتقانة ورئيس أكبر المكشافات في المصادم LEP في المركز سيرن. ويشير إلى أن التقدم في الفيزياء خلال هذا القرن «كان يأتي على الدوام تقريباً من نتائج تجريبية غير متوقعة إطلاقاً». أما اكتشاف المادة المضادة (التي تنبأ بها (ب.أ.م. ديراك) عام 1930) واكتشاف جسيمات Z وW (التي تنبأ بها واينبرك وآخرون) فكانا استثناءين من هذه القاعدة.

ويجادل تينك قائلاً «إننا بحاجة إلى أفكار ثورية في تصميم المسرعات أكثر من حاجتنا إلى نظريات. فليس لدى معظم الجامعات مقررات دراسية في المسرعات. ومن دون مثل هذه المقررات، ومن دون إدخال أفكار جديدة فإن هذا المجال العلمي سيموت». ويضيف: إن هذا يبقى صحيحاً حتى لو تم بناء المصادم SSC.

كانت الخطط تسير قُدماً، منذ بعض الوقت، لإنشاء مسرع خطي كبير أقل قدرة من المصادم SSC لكنه يستطيع تزويدنا بحسابات أكثر دقة، أو «أنظف». والمشروع، الذي يتضمن تعاون فيزيائيين من الولايات المتحدة وأوروبا وآسيا، هو (المصادم الخطي التالي) Next Linear Collider (NLC). ووفقاً للتصور الجاري، فإن هذه الآلة ستتألف من نفق طوله نحو20 كيلومتر تندفع فيه الإلكترونات والبوزترونات ليصدم أحدها الآخر. ويقول المشاركون إنهم يحاولون تجنب المشكلات التي حكمت على المصادم SSC بالإخفاق وذلك بالتأكد من أن الأسس التقنية والسياسية والتمويلية للمسرع قد تم إرساؤها قبل البدء بالبناء. ويؤكدون بصورة خاصة أن المسرع لن ينجح ما لم يحظ بدعم دولي.

وهناك مخططات مسرعات مختلفة تماماً. تتم دراستها في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس وفي مختبر أركون القومي وأمكنة أخرى. وهناك تقنية تدعى (التسريع بوساطة موجة خفقان البلازما)

Plasma Beat – Wave Acceleration، وتتضمن إرسال نبضة ليزرية خلال حجرة تحوي جسيمات متعاكسة الشحنة، أو بلازما. تُحدث النبضة الكهرطيسية موجة في البلازما تستطيع الإلكترونات أن «تُحمل» عليها لتبلغ طاقات عالية. وهناك طريقة مشابهة، هي التسريع بوساطة الحقل الأثر wake-field acceleration تولّد فيها الموجة بوساطة حزمة من الإلكترونات بدلاً من الليزر. ويقدّر (J.D. سيمبسون) (من أركون) أنه يلزم ما بين 15 و20 عاماً لكي تتضج هذه التقانات، ويقول: «هناك الكثير من المشكلات التي ينبغي التغلب عليها».

ويؤكد جورجي أنه ما من آلة يمكن تصورها سوف تثبت التوحيد الكبير أو الكلي، وفي أحسن الأحوال يمكن للتجارب أن تؤدي إلى دليل عَرَضي فقط. ويقول: «لقد أفسدنا خلال العقود القليلة الماضية لأنك لا تحصل على واحد فقط [من البيانات المؤكدة للنظرية] وإنما على عدد منها، بحيث تعرف بالفعل أنك على صواب. أما الآن فأخشى أن نكون مضطرين لأن نرضى بالبيانات التي لا تقنع إلا أولئك الذين كانوا مقتنعين أصلاً». ويضيف: «إنها مشكلة دائمة، فنحن نصطدم بنهاية أساسية للطبيعة».

يدّعي بعض الفيزيائيين، لا سيما الأوروبيون، أنهم يرون أمامهم تحديات لا مآزق. ويصرّح (U. أمالدي) (من المركز سيرن): «أزمة؟ كلا. إنني لا أرى أي أزمة. نحن نحتاج كل يوم إلى طرق جديدة لبناء صور جديدة للطبيعة». ويعتقد دي روجولا أن على الفيزيائيين أن يكونوا شاكرين لأنهم ليسوا على شفا إيجاد نظرية نهائية. ويعلق قائلاً: «لو تم تحويل العلم إلى طقوس دينية لكان ذلك شيئاً محبطاً».

ومع ذلك فإن بعضاً من أقرانهم الأمريكيين يخشون من تفكك هذا الفرع وهم بانتظار بعض الفتوحات المأمولة في المسرعات أو في الرياضيات، ويذكّر لدرمان — وهو نصير دؤوب لتعليم العلوم، حتى إنه مازال يدرّس فيزياء المرحلة الجامعية الأولى — أنه منذ إلغاء المصادم SSC عبّر عدد من طلبته عن قلقهم، ويقول: «يسألونني: ماذا يعني هذا؟ فأقول لهم: لست أدري». ويشرد لحظة ثم يتابع: «لو أنني كنت شاباً لدخلت علوم الدماغ أو (الشواش) Chaos أو علم الحاسوب».

ويكشف كلاشو النقاب عن أن عدداً من أذكى طلبة الدراسات العليا في هارفارد قد ارتدّوا إلى وول ستريت، ويضيف: إن (زاكس كولدمان) يحب الفيزيائيين النظريين». ويلاحظ جورجي أنه حتى قبل تصفية المصادم SSC أدى الهبوط الاقتصادي وتدفق الفيزيائيين من أوروبا الشرقية إلى نقص في وظائف الفيزيائيين في الولايات المتحدة. ويضيف إنه مع ذلك هناك شباب رائعون يدخلون هذا الفرع بدافع الأهمية البالغة للتساؤلات التي يطرحها.

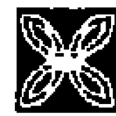
لقد عبر فارادي، كأي واحد آخر، عن علة صعوبة التخلي عن الأمل في أن تحكم الطبيعة قوة وحيدة، فقد كتب هذا العالم البريطاني: «إذا ثبت أن لهذا الأمل أساساً متيناً، فكم تكون القوة التي أحاول التعامل معها عظيمة وجبارة وسامية في كونها لم تتغير حتى الآن، وكم هو واسع حقل المعرفة الجديد الذي يمكن أن ينفتح أمام عقل الإنسان؟».

مراجع للاستزادة

DREAMS OF A FINAL THEORY. Steven Weinberg. Pantheon Books, 1992.

THE END OF PHYSICS: THE MYTH OF A UNIFIED THEORY. David Lindley. Basic Books, 1993.

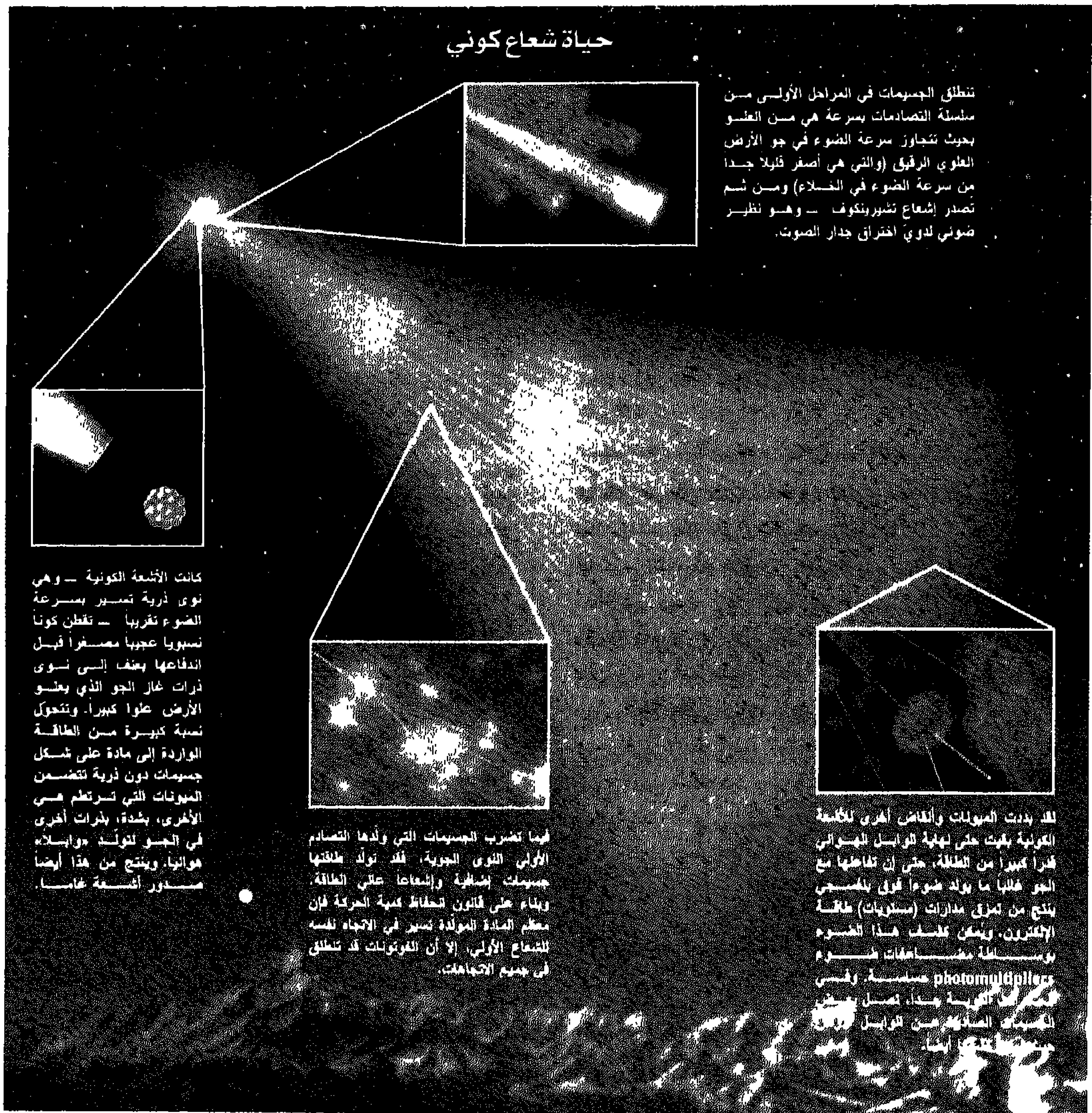
THE GOD PARTICLE: IF THE UNIVERSE IS THE ANSWER, WHAT IS THE QUESTION? Leon Lederman and Dick Teresi. Houghton Mifflin Company, 1993.



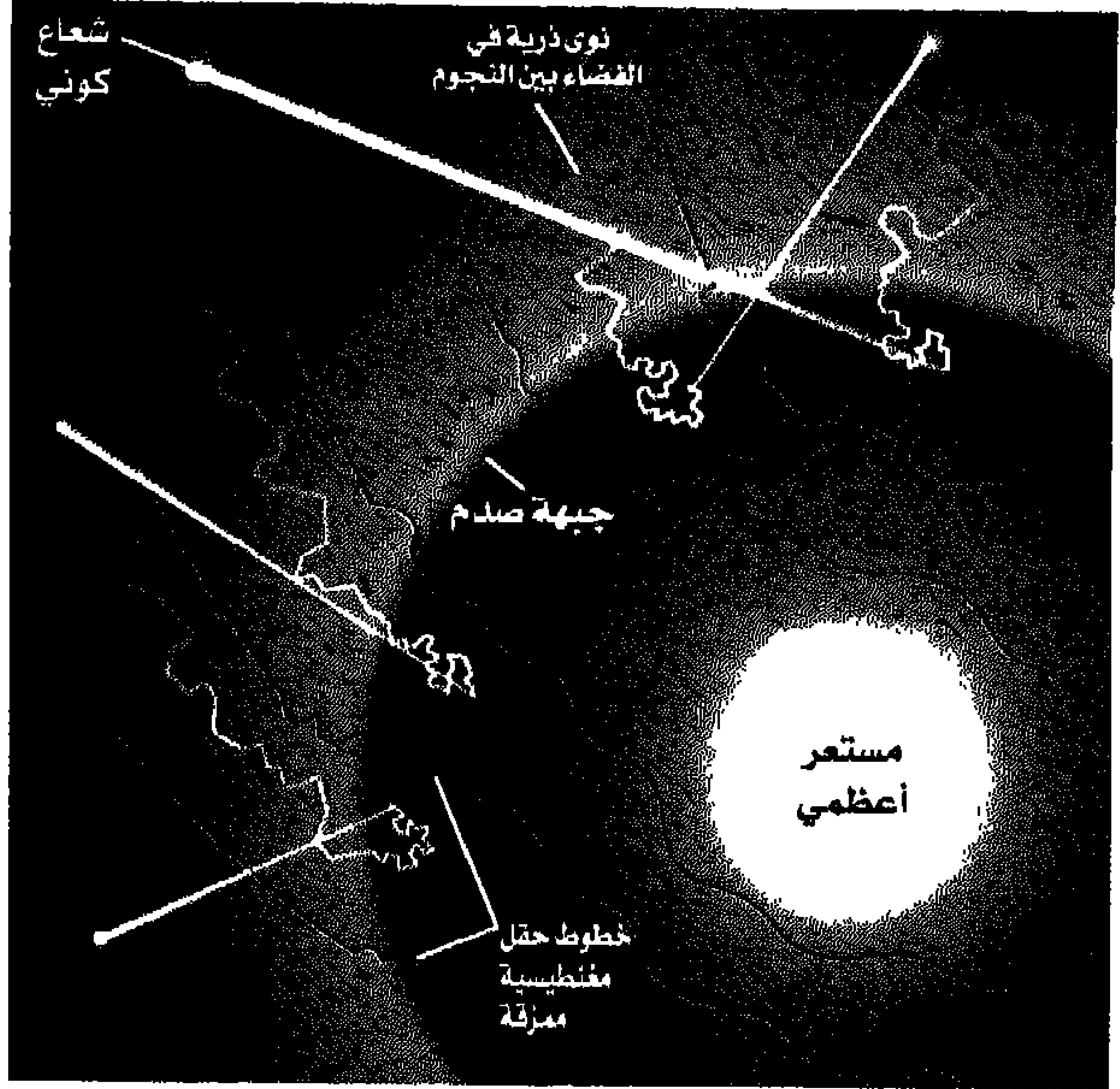
الأشعة الكونية عند حدود الطاقة

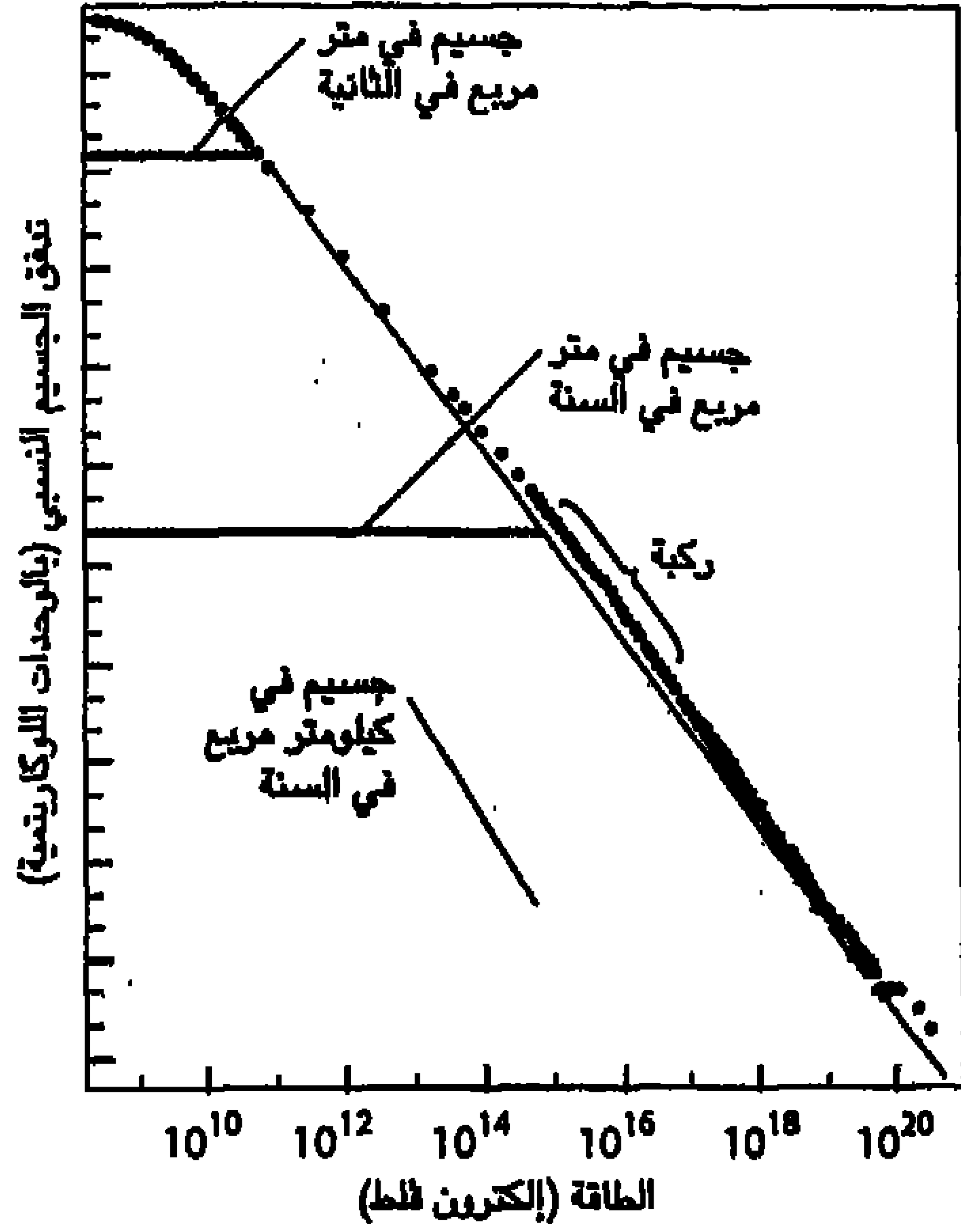
تحمل هذه الجسيمات من الطاقة أكثر مما تحمله أية جسيمات أخرى في الكون. ومع أن مصدرها مازال مجهولاً، إلا أنه قد يكون قريباً منا نسبياً.

(ج.و. كْرونين). (ث.ك. كِيسِرْ).(س.ب. سُوْرْدِي)



في كل ثانية تقريباً يقتحم جسيم دون ذري subatomic جو الأرض حاملاً معه طاقة تعادل طاقة صخرة قُذفت بقوة. ويترتب على هذه الحقيقة وجود قوى في مكان ما من الكون يمكنها أن تمنح لبروتون واحد طاقة تتجاوز 100 مليون مرة الطاقة التي يمكن أن يوفرها أقوى المسرّعات المقامة على الأرض. ترُى، من أين تنطلق هذه القوى. وكيف؟





يُعتقد بأن مسرّع الأشعة الكونية ناتج من انفجار مستعر أعظمي. ويفترض علماء الفيزياء الفلكية أن النوى الذرية التي تخترق جبهة موجات الصدم الناتجة من المستعر الأعظمي تكتسب طاقة من الحقول المغنطيسية المضطربة المغمورة في الصدمة. وقد يُخرِّف مسارُ جسيم بحيث يعبر حدودَ الصدمة مئات، أو حتى آلاف من المرات ويكتسب مزيداً من الطاقة في كل عبورٍ إلى أن يتحرر على شكل شعاع كوني. وتسلك معظم الجسيمات مسارات تجعلها تسير بتسارعات ضئيلة نسبياً هي التي تسبب الشكل العام لطيف طاقة الأشعة الكونية (في اليسار) التي تتساقط بطاقات عالية. وتوحي «الركبة» أو الانحناء في الملحني بأن معظم الجسيمات تُسرّع بآلية غير قادرة على منح أكثر من 10^{15} إلكترون فلط وتشير الزيادة النسبية للجسيمات ذات الطاقات فوق العالية إلى وجود مصدر تسريع إضافي مازالت طبيعته مجهولة حتى الآن.

لقد شغل هذان السؤالان بال الفيزيائيين منذ اكتشاف الأشعة الكونية أول مرة عام 1912 (مع أنه تبيّن الآن أن هذه الأشياء التي نسميها أشعة هي في الواقع جسيمات، إلا أن اسم «الأشعة» مازال يُطلق عليها حتى الآن). ويحوي الوسط الكائن بين النجوم نوى ذرية لجميع العناصر الواردة في الجدول الدوري، وهذه النوى تتحرك كلها بتأثير الحقلين الكهربائي والمغنطيسي، ولولا أثر الحَجْب Screening الذي يقوم به جو الأرض، لخلّفت الأشعة الكونية تهديداً خطيراً لصحة البشر. وفعلاً، فالناس الذين يعيشون في المناطق الجبلية، أو الذين يقومون برحلات كثيرة على متن الطائرات، يتعرضون لجرعة إضافية من الإشعاع وبكميات ملموسة.

وقد تكون أهم سمة لهذا الإشعاع هي أن الباحثين لم يعثروا بعد على حد طبيعي لطيف الإشعاع الكوني. وجدير بالذكر أن لمعظم المصادر المعروفة للجسيمات المشحونة ـ مثل الشمس وريحها الشمسية ـ حدوداً مميزة للطاقة، إذ إنها لا تولّد جسيمات تتجاوز طاقاتها هذه الحدود. وبالمقابل، فإن الأشعة الكونية تظهر بطاقات أعلى مما يمكن لعلماء الفيزياء الفلكية قياسه. وقد توقفت البيانات (المعطيات) عند مستويات تقدر بنحو 300 بليون ضعف طاقة الكتلة السكونية rest- mass للبروتون وذلك لعدم توافر مكشافات في الوقت الحاضر هي من الضخامة بحيث يمكنها أخذ عينات من العدد القليل جداً من الجسيمات الواردة التي تم التنبؤ بها.

ومع ذلك فقد توافرت على فترات زمنية قدرها عدة سنوات أدلة على وجود أشعة كونية ذات طاقات فوق عالية ultrahigh، وكانت هذه الأشعة على شكل جسيمات تضرب الجو مولّدة أعداداً ضخمة من الجسيمات الثانوية (التي يكون كشفها أسهل). وعلى سبيل المثال ففي 1991/10/15 سجل مرصدٌ للأشعة الكونية في صحراء يوتا بالولايات المتحدة وابلاً من الجسيمات الأولية من شعاع كوني طاقته 50 جول ($3X10^{20}$ إلكترون فلط). ومع أن تدفق flux الشعاع الكوني يتناقص مع ازدياد طاقته ، فإن هذا التناقص يتوقف عند قيمة تتجاوز قليلاً 10^{16} إلكترون فلط مما يوحي بأن الآليات المسؤولة عن الأشعة ذات الطاقات فوق العالية تختلف عن تلك الآليات المسؤولة عن الأشعة ذات الطاقات الأكثر اعتدالاً.

وفي عام 1960 تقدم (ب. بيترز)، من معهد تاتا Tata في بومباي، بفرضية مفادها أن الأشعة الكونية ذات الطاقات المنخفضة تتولد في معظمها داخل مجرتنا، في حين تأتينا الأشعة ذات الطاقات العالية من مصادر أخرى بعيدة. وأحد الأسباب الداعية لمثل هذا الاعتقاد هو أن بروتون الشعاع الكوني الذي يحمل طاقة تتجاوز 10^{19} إلكترون فلط، مثلاً، لن ينحرف انحرافاً ذا شأن بوساطة أيٍّ من الحقول المغنطيسية التي تولّدها إحدى المجرات عادة، ومن ثَمّ

فإنه لابد من أن يسير على خط مستقيم إلى حد ما. ولو كانت مثل هذه الجسيمات صادرة عن داخل مجرتنا، لتوقّعنا رؤية أعداد مختلفة آتية من جهات مختلفة لأن مجرتنا لا تتسم بالتناظر حولنا. وخلافاً لذلك فإن توزّع الأشعة الكونية متناح[1] isotropic بصورة أساسية، على عكس توزع الأشعة ذات الطاقات المنخفضة والاتجاهات المبعثرة.

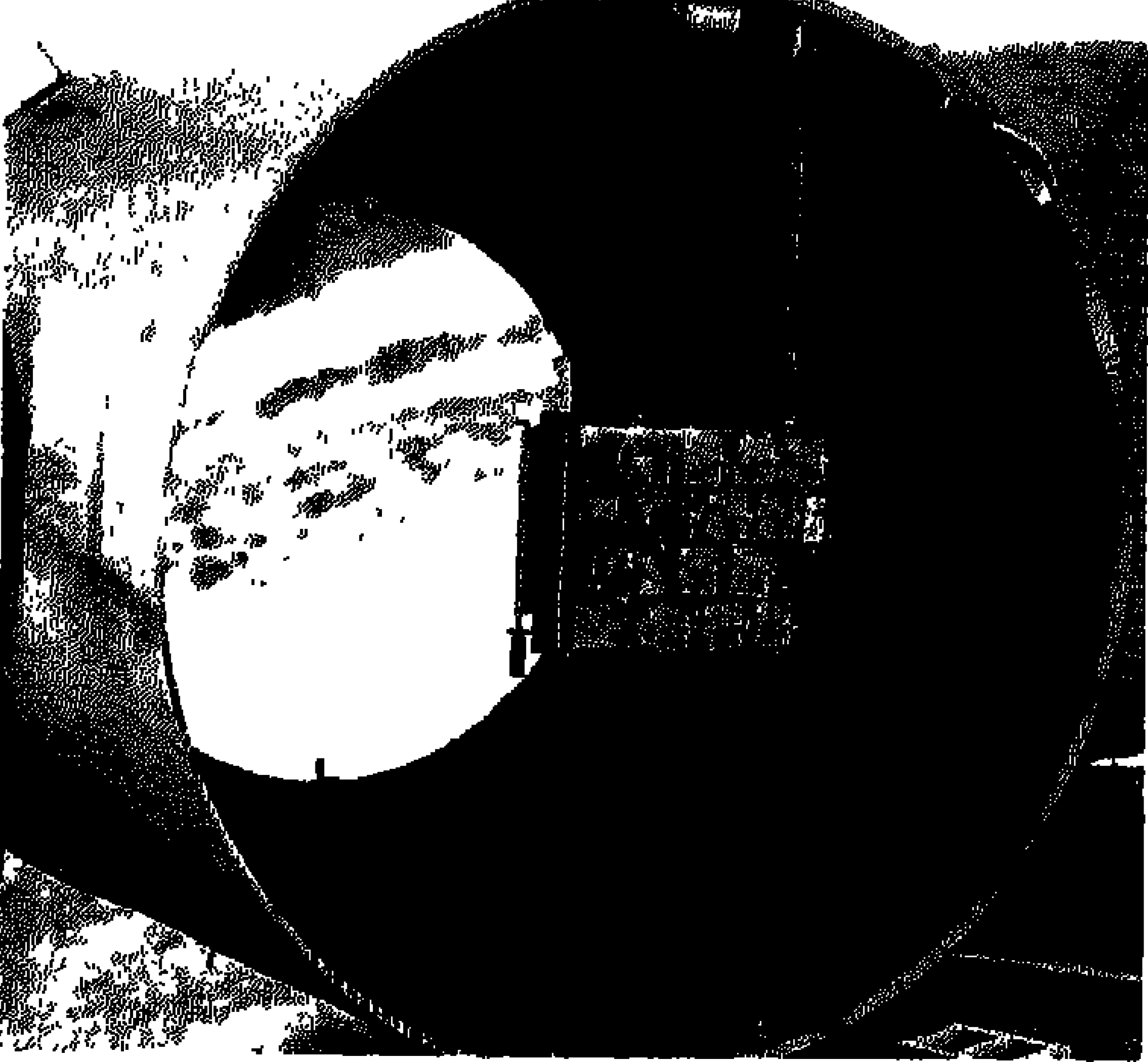
مضخات المستعرات الأعظمية:

تدل مثل هذه الاستنتاجات الضعيفة على ندرة معلوماتنا الأكيدة حول مصدر الأشعة الكونية. ولدى علماء الفيزياء الفلكية نماذج جديرة بالقبول عن الكيفية التي ربما تكوّنت هذه الأشعة وفقها، بيد أنه لا وجود لإجابات قاطعة. وقد تكون هذه القضية المثيرة للجدل ناجمة عن الفرق الذي لا يمكن تصوره تقريباً بين الظروف على الأرض وبين الظروف السائدة في البقاع التي تنشأ فيها الأشعة الكونية. فالفضاء الكائن بين النجوم لا يحوي سوى ذرة واحدة تقريباً في كل سنتيمتر مكعب، وهذه كثافة أخفض كثيراً من كثافة أفضل خلاءات صنعية يمكننا توليدها. إضافة إلى ذلك، فإن هذه البقاع مليئة بحقول كهربائية ومغنطيسية شاسعة مرتبطة بمجموعة واسعة الانتشار من جسيمات مشحونة عددها أقل حتى من عدد الذرات المتعادلة neutral atoms.

إن هذه البقاع أبعد من أن تكون مكاناً هادئاً كما يمكن أن نتوقع: فالكثافات المنخفضة تسمح للقوى الكهربائية والمغنطيسية بالتأثير في مدى مسافات شاسعة ومقاييس زمنية كبيرة، أما في المواد ذات الكثافات الأرضية فإن هذه القوى سرعان ما تضمحل وتخمد. ومن ثم فإن الفضاء الكائن بين المجرات يعج ببلازما طاقية ومضطربة مكوّنة من غاز مؤين في حالة نشاط عنيف. وغالباً ما يكون رصد حركة هذه البلازما أمراً صعباً بالمقاييس الزمنية البشرية نظراً لكبر المسافات الفلكية. ومع ذلك فإن هذه المسافات ذاتها تسمح حتى للقوى المعتدلة بتحقيق نتائج باهرة. فقد ينطلق جسيم عبر مُسَرِّع أرضي ويقطعه خلال بضعة أجزاء من مليون من الثانية، في حين أنه يمكن أن يقضي سنين أو حتى آلاف السنين في النظير الكوني لهذا المسرّع. (وتتسم المقاييس الزمنية بمزيد من التعقيد ناجم عن مناط الإسناد الغريب الذي تشوهه نظرية النسبية والذي تقطعه الأشعة الكونية ذات الطاقات فوق العالية. فإذا أمكننا رصد مثل هذا الجسيم طوال 10000 سنة، فإن هذه المدة تقابل ثانية واحدة فقط بالنسبة إلى الجسيم في مناط إسناده).

وقد خمّن الفلكيون زمناً طويلاً أن معظم الأشعة الكونية المجرّية ــ وهي تلك التي تقل طاقاتها عن 10^{16} إلكترون فلط تقريباً ــ تنطلق من المستعرات الأعظمية. وثمة سـبب وجيه لهذه





يرصد مكشاف وابل هوائي آثار الأشعة الكونية التي تقتحم أعالي جو الأرض. ويمكن للمكشافات الضوئية photodetectors أن تتعقب الضوء الذي تحدثه الجسيمات التي تتفاعل مع جسيمات الهواء وتحدد الطاقة والهوية المحتملة للأشعة الواردة. ومكشاف Fly's Eye (المبين في الحشد المتراص في الصورة في الأسفل) مقام في صحراء يوتا بالولايات المتحدة.

النظرية هو أن الطاقة اللازمة لاستمرار ضخ نوى الأشعة الكونية في مجرتنا (درب التبانة) لا تنخفض إلا قليلاً عن متوسط الطاقة الحركية التي تُنْقَل إلى الوسط الكائن بين المجرات نتيجة للانفجارات الثلاثة للمستعرات الأعظمية التي تحدث كل قرن. وهناك مصادر قليلة أخرى لهذه الكمية من الطاقة في مجرتنا.

وحين ينهار نجم ضخم تنفجر الأجزاء الخارجية منه وتنطلق بسرعات تصل إلى 10000 كيلومتر في الثانية، أو يزيد. ويتحرر قدر مماثل من الطاقة حين يتعرض قزم أبيض إلى تفكك كامل إثْرَ انفجار حراري نووي. وفي كلا نمطي المستعرات الأعظمية تنطلق المادة المقذوفة بسرعات فوق صوتية محدثة موجات صدمية قوية في الوسط المحيط بها. ويُتوقع أن تؤدي هذه الموجات الصدمية إلى تسريع نوى مادة الوسط الذي تجتازه مُحَوِّلة إياها إلى أشعة كونية. ولما كانت الأشعة الكونية مشحونة، فإنها تسلك مسارات معقدة عبر الحقول المغنطيسية المنتشرة بين النجوم. ونتيجة لذلك لا تقدم اتجاهاتها المرصودة من الأرض أي معلومات عن موقع منبعها الأصلي.

---

[1] له سمات متطابقة في جميع النواحي. (المحرر)

يوضح الشكل منطاداً على ارتفاع عالٍ أُطلق قرب قاعدة ماك ميردو في القارة القطبية الجنوبية يحمل مكشافات للأشعة الكونية فوق معظم جو الأرض. وتهب رياح على ارتفاع 40 كيلو متراً من القلنسوة الجليدية في دائرة حول القطب معيدة المنطاد إلى جوار النقطة التي انطلق منها بعد قرابة 10 أيام. ومع أن حساسية المكشافات الموضوعة على متن السوائل، إلا أنه يمكن جعلها ضخم بكثير، كما أن حملها أقل تكلفة إلى حد كبير.

ولدى إمعان الباحثين النظر في الإشعاع السنكروتروني synchrotron radiation الذي يترافق أحياناً مع مخلفات مستعرات أعظمية، فقد توصلوا إلى دليل مباشر على أن المستعرات الأعظمية يمكن أن تؤدي عمل مسرعات، والإشعاع السنكروتروني هو سمة مميزة للإلكترونات العالية الطاقة التي تتحرك في حقل مغنطيسي شديد من النوع الذي يمكن أن يؤدي عمل مسرّع أشعة كونية، ووجود أشعة سينية سنكروترونية في مخلّفات بعض المستعرات الأعظمية يوحي بوجود طاقات عالية جداً. (وفي التجهيزات المقامة على الأرض، تحدّ الإصدارات السنكروترونية من طاقة الجسيم، ذلك أن معدل الإصدار يزداد فيما تتعاظم سرعة الجسيم. وفي إحدى المراحل، يستنزف الإشعاعُ طاقة من جسيم متسارع بالسرعة التي يُمكن ضخّها فيه). ومنذ عهد قريب، التقط ساتل (قمر صنعي) satellite الأشعة السينية الياباني أسكا Asca صوراً لقشرة المستعر الأعظمي 1006 الذي انفجر منذ 990 سنة. وخلافاً للإشعاع المنبعث من داخل الأنقاض، فإن للإشعاع السيني المنبعث من القشرة السمات نفسها المميزة للإشعاع السنكروتروني. وقد استخلص المتخصصون بالفيزياء الفلكية أنه يجري تسريع الإلكترونات هناك لتصل طاقتها إلى 10^{14} إلكترون فلط (100 تريليون إلكترون فلط).

وقد استُعمِل أيضاً المكشاف EGRET في مرصد كومبتون لأشعة غاما Compton Gamma Ray Observatory لدراسة المنابع (المصادر) النقطية لأشعة غاما التي ترافق بقايا المستعرات الأعظمية. هذا وإن الشدات والأطياف المرصودة (وصولاً إلى بليون إلكترون فلط) تنسجم مع ما ينشأ عن اضمحلال جسيمات تُسمّى بيونات متعادلة (حيادية) neutral pions يمكن توليدها بالأشعة الكونية الناتجة من بقايا نجم منفجر لدى تصادمه مع الغاز بين النجمي القريب. بَيْد أنه ممّا يثير الاهتمام هو أن الاستكشافات، التي قام بها مرصد ويبل whipple Observatory المقام على الأرض بحثاً عن أشعة غاما تتمتع بطاقات أعلى كثيراً وتنشأ عن بعض تلك البقايا، لم تُسفر عن أي إشارات بالمستويات المتوقع وجودها فيما لو كانت المستعرات الأعظمية تقوم بتسريع جسيمات إلى 10^{14} إلكترون فلط أو أكثر من ذلك.

وثمة طريقة متممة لاختبار ارتباط الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية بالمستعرات الأعظمية، وهي تتضمن دراسة التركيب العنصري لنوى الأشعة الكونية، إن نصف قطر مدار جسيم مشحون في حقل مغنطيسي يتناسب مع زخمه (كمية حركته) momentum الكلي لكل وحدة من الشحنات، ومن ثم فللنوى الأثقل طاقة كلية أكبر في المدار الواحد. وهكذا فإن أي عملية تفرض حدوداً على تسارع الجسيم على أساس نصف قطر المدار ستؤدي إلى زيادة كبيرة في النوى الثقيلة ذات الطاقات العالية.

وفي نهاية المطاف فإننا نرغب في أن نكون قادرين على السير شوطاً أبعد والبحث عن الآثار العنصرية elemental signatures للتسارع في أنماط محددة من المستعرات الأعظمية. وعلى سبيل المثال فإن المستعر الأعظمي الناشئ عن انفجار قزم أبيض سيسرِّع أي نوى تقطن في الوسط الكائن بين النجوم. وبالمقابل فإن كل مستعر أعظمي أعقب انهيار نجم ضخم يسرِّع الريح النجمية المحيطة به، وهذه سمة مميّزة للطبقات الخارجية لسلَف النجم في المراحل الأولى من نشوئه. وفي بعض الحالات، يمكن أن تحوي الريح نسبة عالية من الهيليوم أو الكربون، أو حتى نوى أثقل.

إن هوية الأشعة الكونية العالية الطاقة تنمحي تقريباً حين تتفاعل مع الذرات في جو الأرض وتكوّن وابلاً من الجسيمات الثانوية. ومن ثَم، فكي تكون واثقاً تماماً من التركيب النووي، فمن

الضروري إجراء قياسات قبل بلوغ الأشعة الكونية الجو الكثيف للأرض. ولسوء الحظ، فإن تجميع 100 شعاع كوني بطاقات قريبة من 10^{14} إلكترون فلط يتطلب وجود مكشاف مساحته 10 أمتار مربعة يسبح في مداره طوال ثلاث سنوات. والمكشافات النموذجية المتوافرة حالياً تكافئ مكشافاً مساحته متر مربع واحد يعمل ثلاثة أيام فقط.

ويعالج الباحثون هذه المشكلة بإجراء بعض التجارب الإبداعية. وعلى سبيل المثال، فقد ابتكرت الوكالة ناسا تقنيات لوضع حمولات كبيرة (نحو ثلاثة أطنان) على متن مناطيد تصل إلى ارتفاعات عالية وتستقر هناك طوال عدة أيام. ولا تكلّف هذه التجارب سوى نسبة ضئيلة من تكلفة مكشاف يوضع على متن ساتل. وقد نفذت أكثر عمليات الطيران من هذا النمط في قارة القطب الجنوبي (الأنتاركتيكا) حيث تهب الرياح الجوية العليا في دائرة ثابتة تقريباً حول القطب الجنوبي.

وقد أُطلقت حمولة من القاعدة ماك ميردو ساوند على ساحل الأنتاركتيكا، وستسير على دائرة مركزها القطب الجنوبي تقريباً ثم تعود أدراجها في نهاية المطاف إلى موقع قريب من موقع الإطلاق. وقد جابت بعض المناطيد هذه القارة طوال 10 أيام. ويقوم أحد كتاب هذه المقالة (سوردي)، بالتعاون مع (د. مولر) و(ب. ميير)، من جامعة شيكاكو، بأخذ القياسات اللازمة عن طريق مكشاف على متن منطاد مساحته 10 أمتار مربعة يستطيع قياس أشعة كونية شديدة تصل طاقاتها إلى 10^{15} إلكترون فلط. وثمّة جهود تُبذل لإطالة مدة التعريض للأشعة إلى 100 يوم تقريباً، وذلك بتنفيذ عمليات طيران مشابهة قريبة من خط الاستواء.

عبر الفضاء الواقع بين المجرات:

إن دراسة الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية التي تزيد حتى على هذه الطاقات ـــ وهي التي تبثها مصادر مازالت خافية علينا ـــ تتطلب مكشافات أرضية ضخمة يمكنها التغلب على التدفق الضعيف للأشعة وذلك برصد مناطق شاسعة طوال أشهر بل سنوات. بَيْدَ أنّ المعلومات يجب استخلاصها من سيل من الجسيمات الثانوية ـــ إلكترونات وميونات muons وأشعة غاما ـــ تنشأ في أعالي الجو عن نواة شعاع كوني وارد. وغاية ما يمكن لمثل هذه الأساليب غير المباشرة أن توحي به لا يتعدى تحديد السمات العامة لتركيب شعاع كوني على أسس إحصائية، وليس تحديد العدد الذري لكل نواة واردة.

وفي المستويات الأرضية تقوم ملايين الجسيمات الأولية التي يطلقها شعاع كوني واحد بالانتشار على مساحة نصف قطرها مئات من الأمتار. ولمّا كان من غير العملي تغطية مثل هذه المساحة الكبيرة بالمكشافات، فإن هذه المكشافات تبحث عن هذه الوابلات الهوائية في مواقع يبعد بعضها عن بعض بضع مئات من الأمتار، أو نحو ذلك.

وقد مكّنت التحسينات التي أُدخلت على مثل هذه التجهيزات من تكديس مجموعات متزايدة من البيانات المتطورة، وذلك بتنقيح النتائج التي يمكننا استخلاصها من كل وابل. وعلى سبيل المثال، فإن تجربة CASA- MIA- DICE، التي أجريت في يوتا وشارك فيها اثنان من مؤلفي هذه المقالة (كرونين وسوردي)، تقيس توزعات الإلكترونات والميونات عند مستوى الأرض. وهي تتحرى كذلك ضوء تشيرينكوف Cerenkov (وهو نمط من موجات الصدم الضوئية التي تولّدها جسيمات تتجاوز سرعتها سرعة الضوء في الوسط المحيط بها) الذي تولّده زخّات من الجسيمات على مستويات مختلفة من الجو. وتمكّننا هذه البيانات من إعادة بناء هيئة الوابل على نحو أكثر وثوقية ممّا يجعلنا نتوصل إلى تخمين أفضل لطاقة الأشعة الكونية التي ولّدته ولهوية هذه الأشعة.

ويعمل ثالثنا (كيسر) على صفيف[2] array يقيس الوابلات التي تصل إلى سطح القطب الجنوبي. وتُجْرى هذه التجربة بالتنسيق مع AMANDA التي تتحرى وجود الميونات الطاقيّة التي تنشأ في الوابلات نفسها، وذلك برصد إشعاع تشيرينكوف الذي يتولد في أغوار القلنسوة الجليدية ice cap. والهدف الرئيسي الذي تسعى إليه AMANDA هو العثور على آثار للنيوترينوهات التي تولّدت في المسرّعات الكونية، والتي قد تولّد وابلات تتدفق نحو الأعلى بعد عبورها الأرض.

وفضلاً عن تجميع بيانات أفضل، فإن الباحثين عاكفون أيضاً على تحسين المحاكيات الحاسوبية التي تنمذج كيفية نشوء الوابلات الهوائية. وتساعدنا هذه المحاكيات على فهم كل من إمكانات القياسات التي تؤخذ من الأرض وحدودها. ويجدر القول بأن التوسع إلى تجارب تحري طاقات أعلى للأشعة الكونية المباشرة، الأمر الذي يجعل كلاً من المكشافات الأرضية والمحمولة في الجو تقوم برصد الأنماط ذاتها من الأشعة الكونية، سيساعد أيضاً على معايرة بياناتنا التي تزودنا بها تجهيزاتنا الأرضية.

عمالقةٌ نادرون:

إن الأشعة الكونية التي تفوق طاقاتها 10^{20} إلكترون فلط تضرب جو الأرض بمعدل جسيم واحد تقريباً لكل كيلومتر مربع في العام: ويترتب على هذا أن دراستها تتطلب مكشافاً ضخماً جداً للوابلات الهوائية. وفضلاً على حادث عام 1991 في يوتا، فقد رُصِدَتْ جسيمات تتعدى طاقاتها 10^{20} إلكترون فلط من قِبَل

---

[2] هو مجموعة مركّبات كالهوائيات والعاكسات والموجّهات تُرتّب بحيث توفر التغيير الاتجاهي المطلوب في إرسال الإشعاع أو استقباله. (المحرر)

مجموعات في أمكنة أخرى، في الولايات المتحدة وأكينو في اليابان وهافيرا بارك في المملكة المتحدة وياكوتسك في سيبيريا.

وتثير الجسيمات التي لها مثل هذه الطاقة العالية مشكلة تدعو إلى الحيرة. فمن ناحية، فإنه يُحتمل ورودها من خارج مجرتنا وذلك بسبب عدم وجود آلية تسريع معروفة يمكنها أن تولّدها، ولأنها تقترب من جميع الاتجاهات دون أن يكون أيُّ حقل مغنطيسي مجرّي كافياً لِثَنْي مسارها. ومن ناحية أخرى، فإن مصدرها لا يمكن أن يبعد عنا أكثر من قرابة 30 مليون سنة ضوئية، لأنه إذا لم يتحقق ذلك فقدت الجسيماتُ طاقةً بتفاعلها مع الخلفية الإشعاعيّة المكروية (الصغرية) Microwave background الكونية — وهي الإشعاع الذي تخلّف عن نشوء الكون نتيجة الانفجار الأعظم. ففي الكون النسبوي relativistic الذي تقطنه الأشعة الكونية الأعلى طاقة، فإن فوتوناً وحيداً راديوي التردد radio- frequency يمكن أن يكون له من قوة التأثير بحيث يسلب جسيماً الكثير من طاقته.

وإذا كانت مصادر مثل هذه الجسيمات العالية الطاقة موزعة بانتظام في الكون، فإن تفاعلها مع الخلفية الإشعاعية المكروية سيسفر عن تقليص حاد لعدد الجسيمات التي تفوق طاقاتها $5x10^{19}$ إلكترون فلط، إلا أن واقع الحال خلاف ذلك. ويوجد حتى الآن عدد جدّ قليل من الجسيمات التي تتجاوز طاقاتها هذه العتبة ($5x10^{19}$ إلكترون فلط)، الأمر الذي يَحُولُ بيننا وبين معرفة حقيقة ما يجري. بيد أنه حتى هذا العدد القليل من الجسيمات التي رصدناها، فإنه يهيئ لنا فرصة فريدة لتقديم النظرية المناسبة. ولمّا كانت هذه الأشعة لم تُحْرَف بصورة جوهرية بوساطة الحقول المغنطيسية المنتشرة بين المجرّات، فإن قياس اتجاه سير عيّنة كبيرة لابد أن يقدم حلولاً للألغاز المحيطة بمواقع مصادرها.

إنه لأمر مثير للاهتمام أن نتفكّر في ماهية هذه المصادر. وثمة ثلاث فرضيات حديثة تقدم الاحتمالات التالية: أقراصُ تَنَامٍ لثقوب سوداء مجرية، وانبثاقات لأشعة غاما، وعيوبٌ طبولوجية في بنية الكون.

وقد تنبأ علماء الفيزياء الفلكية بضرورة وجود ثقوب سوداء، تعادل كتلها بلايين كتلة الشمس أو يزيد، تقوم بتجميع المادة في نوى المجرات النشيطة، وذلك لدفع دفقات نسبوية من المادة إلى داخل الفضاء الكائن بين المجرات بسرعات قريبة من سرعة الضوء، وقد رُسِمت خرائطُ لهذه الدفقات بالمقاريب الراديوية. ويرى (ب.ل. بييرمان)، من معهد ماكس بلانك للفلك الراديوي في بون ومعاونوه، أن البقع الحارة التي تشاهَد في هذه الفصوص الراديوية هي جبهات موجات صدمية تسرّع الأشعة الكونية إلى طاقات فوق عالية. وثمة دلالات على أن اتجاهات الأشعة الكونية ذات الطاقات العظمى تتبع إلى حد ما توزع المجرات الراديوية في السماء.

وتنطلق التخمينات حول اندفاعات أشعة غاما من النظرية القائلة بأن هذه الاندفاعات تنجم عن انفجارات نسبوية قد تكون ناشئة عن التحام نجوم نيوترونية: وقد لاحظ (م. فييتري) — من مرصد روما الفلكي و(إ. واكسمان) من جامعة برنستون، كل على حدة — شبهاً إلى حد ما بين الطاقة الموجودة في مثل هذه الجائحات والطاقة اللازمة لتزويد التدفق المرصود للأشعة الكونية ذات الطاقة العظمى. ويحاج الاثنان في أن موجات الصدم ذات السرعات فوق العالية والتي تسوقها مثل هذه الانفجارات تؤدي دورَ مسرّعات كونية.

وقد تكون أكثر الأفكار إثارة للاهتمام تلك التي مفادها أن الجسيمات ذات الطاقة فوق العالية مدينة بوجودها لتفكك أحاديات القطب monopoles والأوتارِ strings وجدران المدى[3] domain walls وعيوب طبولوجية[4] أخرى ربما سبق تكونها في بواكير الكون. ويُعتقد أن هذه الأشياء الافتراضية تحوي مخلفات طور مبكر أكثر تناظراً للحقول الأساسية في الطبيعة حين كانت قوى الثقالة والكهرمغنطيسية والقوى النووية الضعيفة والقوية مندمجة. ويُمكن اعتبارها، إلى حد ما، جيوباً لا متناهية في الصغر تحتفظ بقطع من الكون على النحو الذي كان عليه في اللحظات الأولى التي أعقبت الانفجار الأعظم.

وفيما كانت هذه الجيوب تنهار ويختل تناظر القوى داخلها، كانت الطاقة المخزونة فيها تتحرر على شكل جسيمات فائقة الكتلة سرعان ما تفككت متحولة إلى دفقات من الجسيمات تصل طاقاتها إلى درجة تَكْبُرُ 100000 مرة طاقات جسيمات الأشعة الكونية ذات الطاقات فوق العالية. وفي هذا «السيناريو» فإن الأشعة الكونية ذات الطاقات فوق العالية التي نرصدها هي ذلك النتاج الضعيف نسبياً لشلالات الجسيمات الكونية.

وأياً كان مصدر هذه الأشعة الكونية، فإن ما يتحدانا هو جمع قدْرٍ كافٍ منها للبحث عن علاقاتها الواضحة بالأجسام المنتمية إلى خارج مجرتنا. وللصفيف AGASA الموجود حالياً في اليابان مساحة فعالة قدرها 200 كيلومتر مربع، كما أن تجربة المكشاف Fly's Eye Hires الجديدة في يوتا ستغطي قرابة 1000 كيلومتر مربع. بيْد أن كل مكشاف لا يمكنه أن يتصيد في السنة سوى بضعة جسيمات من ذات الطاقات فوق العالية.

وطوال السنوات القليلة الماضية، كان كل من كرونين و(أ.أ. واطسون) (من جامعة ليدز) يتقدمان الركب في السعي لتجميع عينة أكبر من الأشعة الكونية ذات الطاقات فوق العالية. ويسمى مشروعهما هذا مشروع أوجيه Auger Project نسبة إلى بيير أوجيه، وهو عالم فرنسي كان أول من بحث ظاهرة ارتباط

---

(3) هي حدود مناطق الإخلال بالاتزان المحلي للمادة.

(4) هي العيوب الناتجة بشكل عام من الإخلال بالاتزان المحلي سواء على المستوى التقليدي أو النسبوي. (المحرر)

وابلات الجسيمات بالأشعة الكونية. وخطة المشروع هي تهيئة مكشافات مساحتها 9000 كم^2 قادرة على قياس مئات الجسيمات العالية الطاقة كل سنة. وسيكون حقل المكشافات مؤلفاً من عدة محطات في شبكة يفصل بين كل زوج منها 1.5 كيلومتر، وقد يتمكن جسيم وحيد أن يثير دستات من المحطات.

وقد بينت ورشة عمل حول تصميم مشروع أوجيه عقدت في مختبر فيرمي للمسرّع الوطني عام 1995 كيفية تمكّن بعض التقانات الحديثة، كالخلايا الشمسية والهواتف الخلوية ونظام تحديد المواقع على الكرة الأرضية، من جعل بناء هذا النظام أسهل بكثير. وتجدر الإشارة إلى أن مكشافاً بمساحة ولاية رود أيلاند يمكن بناؤه بكلفة تقريبية تعادل 50 مليون دولار. ولتغطية السماء كلها، فقد خطط لبناء اثنين من هذه المكشافات أحدهما لنصف الكرة الشمالي والآخر لنصف الكرة الجنوبي.

وفيما يواجه الباحثون مشكلة بناء مثل هذه الشبكات الضخمة للمكشافات وتشغيلها يبقى السؤال الأساسي قائماً وهو: أيمكن للطبيعة إنتاج جسيمات طاقاتها أعلى من تلك التي رصدناها؟ وهل ثمة وجود لأشعة كونية ذات طاقات أعلى، أم أننا بدأنا فعلاً بتحري وجود جسيمات طاقاتها هي أعلى الطاقات التي يمكن أن تتولّد في الكون؟

المؤلفون

James W. Cronin - Thomas K. Gaisser - Simon P. Swordy

يبحثون في المسائل النظرية حول كيفية ولادة الأشعة الكونية والمسائل العملية حول كشفها وتحليلها. يعمل كرونين أستاذاً للفيزياء في جامعة شيكاگو منذ عام 1971، وقد حصل على الماجستير من هذه الجامعة عام 1953 وعلى الدكتوراه منها أيضاً عام 1955. وفي عام 1980 تقاسم جائزة نوبل مع (ف.ل. فيتش) لقاء بحوثهما حول انتهاكات التناظر في تفكيك الميزونات. أما گيسر، وهو أستاذ للفيزياء في جامعة ديلاوير، فقد تناولت بحوثه تفسير الشلالات الجوية للأشعة الكونية، وقد حصل على الدكتوراه من جامعة براون عام 1967. وفي عام 1995 قضى گيسر شهرين في القارة القطبية الجنوبية حيث شيّد مكشافات للأشعة الكونية. وأما سوردي فهو أستاذ مشارك في جامعة شيكاگو، وقد بذل جهوداً حثيثة في قياس الأشعة الكونية منذ عام 1976. وقد حصل على الدكتوراه من جامعة بريستول عام 1979.

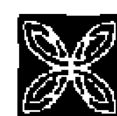
مراجع للاستزادة

Introduction To Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics. Pierre Sokolsky. Addison - Wesley, 1988.

Cosmic Rays And Particle Physics. Thomas K. Gaisser. Cambridge University Press, 1990.

High Energy Astrophysics, Vol. 1. Second edition. Malcolm S. Longair. Cambridge University Press, 1992.

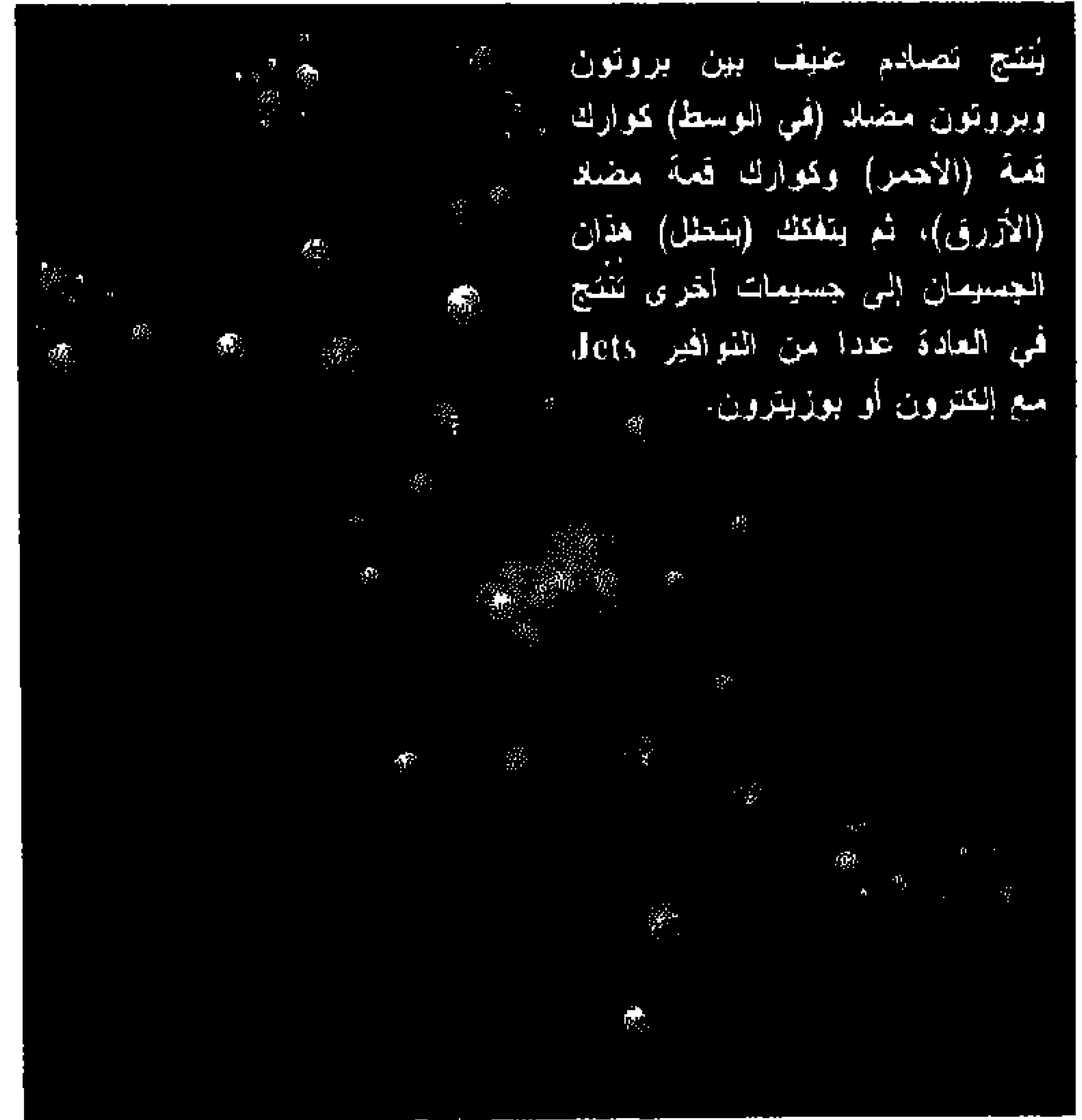
Cosmic Ray Observations Below 10^{14} eV. Simon Swordy in *Proceedings of the XXIII International Cosmic Ray Conference.* Edited by D. A. Leahy. R. B. Hicks and D. Venkatesan. World Scintific, 1994.



اكتشاف كوارك القمة

إن العثور على الكوارك[1] السادس تطلب أعلى التصادمات طاقة في العالم وجهوداً كبيرة من آلاف الأشخاص.

(ت.م ليس). (ب.ل تيبتون)



يُنتج تصادم عنيف بين بروتون وبروتون مضاد (في الوسط) كوارك قمة (الأحمر) وكوارك قمة مضاد (الأزرق)، ثم يتفكك (ينحل) هذان الجسيمان إلى جسيمات أخرى تُنتج في العادة عددا من النوافير Jets مع إلكترون أو بوزيترون.

شهد اجتماعان علميان، دُعي إليهما على عجل في الشهر 1995/3، حَدَثاً تاريخياً، وكان ذلك في مختبر فيرمي (فيرميلاب) للمسرع القومي قرب شيكاكو. فقد أعلن فيزيائيون يقومون بتجارب متنافسة داخل المختبر في حلقتين دراسيتين متتاليتين عن اكتشاف جسيم جديد ــ كوراك القمة ــ ووضعوا بذلك حداً لعقود طويلة من البحث عن آخر جزء من المنوال (النموذج) المعياري Standard Model لفيزياء الجسيمات.

إن كوارك القمة هو سادس الكواركات وآخرها على الأغلب. تُشكل اللبتونات الإلكترون وأشباهه ــ والكوراكات البنى الأساسية للمادة. وهكذا، فإن الكواركات الأكثر خفة (الكوارك الفوقي والكوارك التحتي) تكوّن البروتونات والنيوترونات المعروفة، كما أنها تكوّن مع الإلكترونات الجدول الدوري بأكمله. أما الكواركات الأثقل [الكوارك البديع (الرقية) والغريب والقمة والقاعدة] واللبتونات فهي، وإن كانت قد وجدت بكثرة في اللحظات الأولى التي تلت الانفجار الأعظم[2]، فإنها لا تُنتَج الآن إلا في المسرّعات. والمنوال المعياري يوصّف تفاعلات البنى الأساسية هذه، ويتطلب هذا التوصيف وجود اللبتونات والكواركات على شكل أزواج تسمى أجيالا generation، في معظم الحالات.

وهكذا فقد أدرك الفيزيائيون ضرورة وجود كوارك القمة منذ عام 1977 عندما اكتشف مرافقه كوارك القاعدة، إلا أنه تبين وبشكل مقيت صعوبة العثور على كوارك القمة؛ فهو وإن كان جسيماً أساسياً (تركيب ملحوظ) فإن كتلته كبيرة: 175 بليون إلكترون فلط[3]، وهي كتلة تضاهي كتلة ذرة الذهب كما أنها أكبر بكثير مما توقع أغلب النظريين. فكتلة البروتون مثلاً (وهو مكون من كواركين فوقيين وكوارك تحتي) لا تتجاوز الجيف الواحد (1 بليون إلكترون فلط).

إن تكوين كوارك قمة يتطلب تركيز طاقة هائلة في حيز دقيق، وهذا ما يفعله الفيزيائيون عادة، وذلك بتسريع جسيمين وجعل أحدهما يرتطم بالآخر. وقد كان التجريبيون يأملون أن تؤدي بضعة آلاف البلايين (تريليونات) من التصادمات إلى تكوين كوارك قمة، ولكننا كنا نجهل كمية الطاقة اللازمة لذلك. فنظرية المنوال المعياري، وإن كانت تنبأت بخواص عديدة لكوارك القمة (تتعلق بشحنته وسبينه[4] Spin)، فإنها لم تضع حداً لكتلته.

وعلى الرغم من أنه يمكن تكوين الجسيمات من الطاقة وحدها، فإن بعض المقومات كالشحنة الكهربائية لا تتأتى عن هذا الطريق

---

[1] الكوارك: أحد الجسيمات الأساسية الافتراضية، له شحنة تساوي 1/3 أو 2/3 شحنة الإلكترون. ويمكن أن ينشأ عنه نظرياً، العديد من الجسيمات الأولية.

[2] the big - bang

[3] 1 بليون إلكترون فلط = 1 جيف GEF، والإلكترون فلط هو وحدة طاقة (E) تربطها بالكتلة (m) العلاقة: $E = mC^2$، حيث (C) هي سرعة الضوء في الخلاء.

[4] عزمه الزاوي الصحيح.

ـ إذ إنها «منحفظة»[5]. وهكذا فلا يمكن أن يتولد كوارك القمة وحده، وأسهل الطرق هو تكوين كوارك قمة وكوارك قمة مضاد في آن واحد. فللجسيم المضاد الكتلة نفسها، ولكن خواصه الأخرى ذات إشارات معاكسة، بحيث تكون الكميات المنحفظة مساوية للصفر تماماً.

كان قد مضى على بدء البحث عن كوارك القمة ثماني سنوات عندما شرع مصادم فيرميلاب بنشاطه عام1985. أما المساعي المبكرة لمركز ستانفورد للمسرع الخطي في بالو آلتو ومساعي DESY في هامبورك بألمانيا، فإنها لم تثمر. وهكذا فقد تنقل البحث عن كوارك القمة عبر السنين من مسرع إلى آخر، وذلك تبعاً لارتفاع طاقة حزم الجسيمات. وقد استطاع المختبر CERN[6] في أوائل الثمانينيات توليد جسيمات عديدة (الجسيمات W^+ ، W^- ، Z^0) وذلك من خلال تصادمات حزم من البروتونات والبروتونات المضادة تصل طاقتها إلى 315 جيف.

وخلافاً للكواركات واللبتونات التي تتركب منها المادة، فإن هذه الجسيمات الجديدة مسؤولة عن التفاعل؛ فهي التي تنقل القوى ـ وعلى الخصوص القوى النووية الضعيفة المتمثلة ببعض أشكال التفكك الإشعاعي. وقد أدى اكتشافها إلى تعزيز نظرية المنوال المعياري التي تنبأت بدقة، بكتل هذه الجسيمات. وهكذا ساد الاعتقاد أن اكتشاف كوارك القمة سيتم قريباً في المختبر CERN.

ولكن العثور عليه مازال أمراً عسيراً؛ ذلك أن الاصطدام بين البروتون والبروتون المضاد في طاقات عُليا هو في واقع الأمر اصطدام بين المكونات الداخلية: الكواركات والكلوونات gluons. ولا يحتمل كل كوارك أو كلوون إلا قدراً بسيطاً من الطاقة الكلية للبروتون أو البروتون المضاد. وعلى هذا القدر البسيط أن يكون مع ذلك كافياً لإنتاج كوارك القمة. والاصطدامات بين المكونات نادرة، وتزداد ندرة بقدر ما ترتفع الطاقة المطلوبة ـ أي كتلة كوارك القمة.

استنتج التجريبيون من عدم ملاحظة وجود كوارك القمة في المختبر CERN عام 1988 أن كتلته هي حتماً أكبر من 41 جيف. وفي هذه الأثناء حصل مصادم فيرميلاب على الكاشف الجديد الخاص بالمجموعة CDF (كاشف مصادم فيرميلاب). وانتهى عقد الثمانينيات وما رافقه من تنافس كبير بين مجموعتنا ومجموعة المختبر CERN من دون أن نعثر على كوارك القمة، ولكننا توصلنا إلى أن كتلته لا تقلّ عن 77 جيف.

وهذا يعني أن مساعي المختبر CERN في هذا المضمار قد بلغت حدها؛ إذ لن تتمكن الاصطدامات بطاقة حزمه الضعيفة نسبياً

خواص المنوال المعياري

من تكوين كوارك قمة أثقل من 77 جيف. وانحصرت المنافسة بين المجموعة CDF وبين القائمين بتجربة جديدة على الطرف المقابل من حلقة مسرع مختبر فيرمي. (ويطلق على هذه المجموعة DO، حيث D ترمز إلى الكاشف وO إلى موقعه على الحلقة).

لقد نشأت فكرة تكوين مجموعتين متنافستين في أوائل الثمانينيات عندما رأى (ل.م. ليدرمان) مدير المختبر فيرميلاب أن المجموعة CDF بحاجة إلى منافس محلي، وهكذا أصبح لنا منافسون في مختبرنا. فقد بدأ تكاتف المجموعة DO في مطلع عام 1992 بجمع البيانات. وقد تبين أن وجود تجربتين متكاملتين تدرسان الفيزياء نفسها فكرة صائبة، إذ إنها تسمح بمقارنة النتائج التي قد تكون خاطئة على الرغم من الجهود المبذولة في هذا المضمار، إضافة إلى أنها تحفز هذه الجهود.

إن كلاً من التجربتين CDF وDO تمثل تعاوناً علمياً دولياً بين ما ينوف على 400 فيزيائي، إضافة إلى العديد من المهندسين والتقنيين والمساعدين. إن الفريقين المتنافسين مستقل أحدهما عن الآخر ولا يتعاونان في تحليلهما، ويحاول كل منهما أن يحوز قصب السبق في مباراة ودية.

---

[5] Conserved.

[6] المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات ويقع بالقرب من جنيف.

حدث كوارك قمة تقليدي

يسير البروتون والبروتون المضاد في اتجاهين متعاكسين على امتداد خط الحزمة (موجه إلى خارج الصفحة) ويتصادمان في مركز كاشف المصادمات في مختبر فيرمي (CDF) (a). يُنتج التصادم أربع نوافير متميزة (b) وبعض جسيمات أخرى. هناك نافورتان، عيّن نوعيهما كاشف السيلكون الرأسي، ناتجتان من تفكك كواركات القاعدة؛ في حين نتجت الأخريان من تفكك (السهم الأحمر). تنبه النوافيرُ المتعددة والوجودُ المرافق للبوزيترون التجريبيين إلى إمكانية تكوين كوارك قمة.

كان جزءاً من اتفاق غير مدون حول التجربتين ــ ألاّ تناقش نتائج أي تحليل فيزيائي خارج نطاق التعاون العلمي إذا لم يتبنه هذا التحليل. إلا أنه كان واضحاً أيضاً أن كتمان السر في البحث عن كوارك القمة أمر عسير، فبغض النظر عن عناصر أخرى، كان هناك ثلاثة فيزيائيين أو فيزيائيات على الأقل تعمل زوجاتهم أو يعمل أزواجهن مع الفريق المنافس. ولكي لا ندَع مجالاً للإشاعات فقد اتفقنا مع المجموعة DO على أن يُخطر كل فريق الفريق الآخر قبل أسبوع على الأقل من الإعلان بما يجده جديراً بذلك.

إن الجانب الحاسم في تجارب فيزياء الطاقات العالية هو الكاشف الذي يرصد الحطام الناتج من التصادم. وقد توقّعنا انطلاقاً من أفضل الحسابات النظرية أنه يمكن إنتاج كوارك قمة واحد من خلال عشرة بلايين اصطدام. والمهم بالنسبة إلينا هو تحديد الاصطدام الذي يولد كوارك القمة من بين الاصطدامات المعقدة الأخرى التي تهم عدداً من المشاريع.

وعلى مدى عشر سنوات بنت كل من المجموعتين SDF وDO أجهزة ضخمة ومعقدة تحتوي على مئات آلاف القنوات الإلكترونية هدفها عزل «توقيع» كوارك القمة، أي الأثر الذي يتركه في الكاشف. وفي حين كان كاشف المجموعة CDF يُؤثر التتبع الدقيق لمسارات الجسيمات في الحقل المغنطيسي (حتى يستطيع قياس عزومها)، كانت تجهيزات المجموعة DO تعتمد على مسعر Calorimeter مقسم بدقة، يقيس الطاقة الناتجة من كل اصطدام.

يتفكك كوارك القمة وكواركه المضاد لحظة إنتاجهما تقريباً. فكوارك القمة، خلافاً لما هي عليه الحال بالنسبة إلى الكواركين الفوقي والتحتي المستقرين، لا يُعمّر سوى (10^{-24}) ثانية، وعلى الدوام تقريباً يتفكك حسب تنبؤات المنوال المعياري ــ شرط أن يكون ثقيلاً كفاية ــ إلى جسيم W وكوارك القاعدة. وهكذا فإذا تكون كوارك قمة وكوارك قمة مضاد، فإنهما سيولدان جسيمي W وكوارك قاعدة وكوارك قاعدة مضاد.

ولكن، لسوء الحظ، لا يمكن ملاحظة الجسيم W وكواركات القاعدة مباشرة. فمدة حياة الجسيم W تقارب مدة حياة كوارك القمة. كما أن كوارك القاعدة غير مستقر أيضاً على الرغم من أن عمره أطول بكثير من عمر كوارك القمة. أضف إلى هذا أن الكواركات المنفردة ــ العارية ــ لا يمكن إنتاجها؛ إذ إن القوى القوية التي تربط بين الكواركات تجعلها لا تظهر إلا لاصقة بعضها ببعض على شكل أزواج تسمى الميزونات Mesons، أو على شكل ثلاثيات تسمى باريونات Baryons (والبروتونات والنيوترونات هي أمثلة على الباريونات) فعندما يخرج كوارك من اصطدام «تحيط به» غيمة من الكواركات والكواركات المضادة. وما يلاحظ هو نافورة jet، أي حزمة من الجسيمات تتحرك في اتجاه حركة الكوارك البدائي تقريباً.

يمكن للجسيم W أن يتفكك إلى كوارك وكوارك مضاد من الجيل نفسه: كوارك فوقي وكوارك تحتي مثلاً. وفي هذه الحالة يظهر الكوارك والكوارك المضاد في الكاشف على شكل نافورتين. ولكن يمكن للجسيم أيضاً أن يتفكك (يتحلل) «ليبتونياً» إلى ليبتون مشحون وآخر حيادي من الجيل نفسه: إلى إلكترون ونوترينو مثلاً.

يمكن رؤية الليبتون المشحون مباشرة في الكاشف إذا كان هذا الليبتون إلكتروناً أو ميوناً muon (وهو نسخة ثقيلة عن الإلكترون)، ولكن الليبتون تاو Tau (وهو نسخة أخرى عن الإلكترون أكثر ثقلاً) يتفكك بسرعة تجعل من الصعب تعرّف هويته. أما النيوترينو (وهو عديم الكتلة أو صغيرها) فيمر عبر الكاشف من دون أن يُلاحظ. ولكن وجوده، لحسن الحظ، يُستنتج بشكل غير مباشر لأنه يحمل معه جزءاً من العزم. فعندما تُجمع عزوم جميع الجسيمات المرئية في الكاشف ويُلاحظ نقصٌ كميةٍ من العزم الكلي لا يستهان بها، فمعنى ذلك أن نيوترينو ما قد حملها معه.

عندما بدأنا بأخذ البيانات في الشهر 1992/8، دفعنا بحد كتلة كوارك القمة إلى 91 جيف، وكان ذلك بمثابة مَعْلَمة. فالجسيم W يؤدي دور الوسيط في تفاعلات الكواركات المنتمية إلى الجيل نفسه ــ بين القمة والقاعدة مثلاً. فلو كان كوارك القمة خفيفاً بما فيه الكفاية ــ أقل من 75 جيف ــ لأمكن للجسيم W إنتاجه، وذلك نتيجة تفككه إلى كوارك قمة وكوارك قاعدة مضاد. ولكننا عرفنا حينذاك أن الإمكانية الوحيدة للعثور على كوارك القمة هي تكوين زوج من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد.

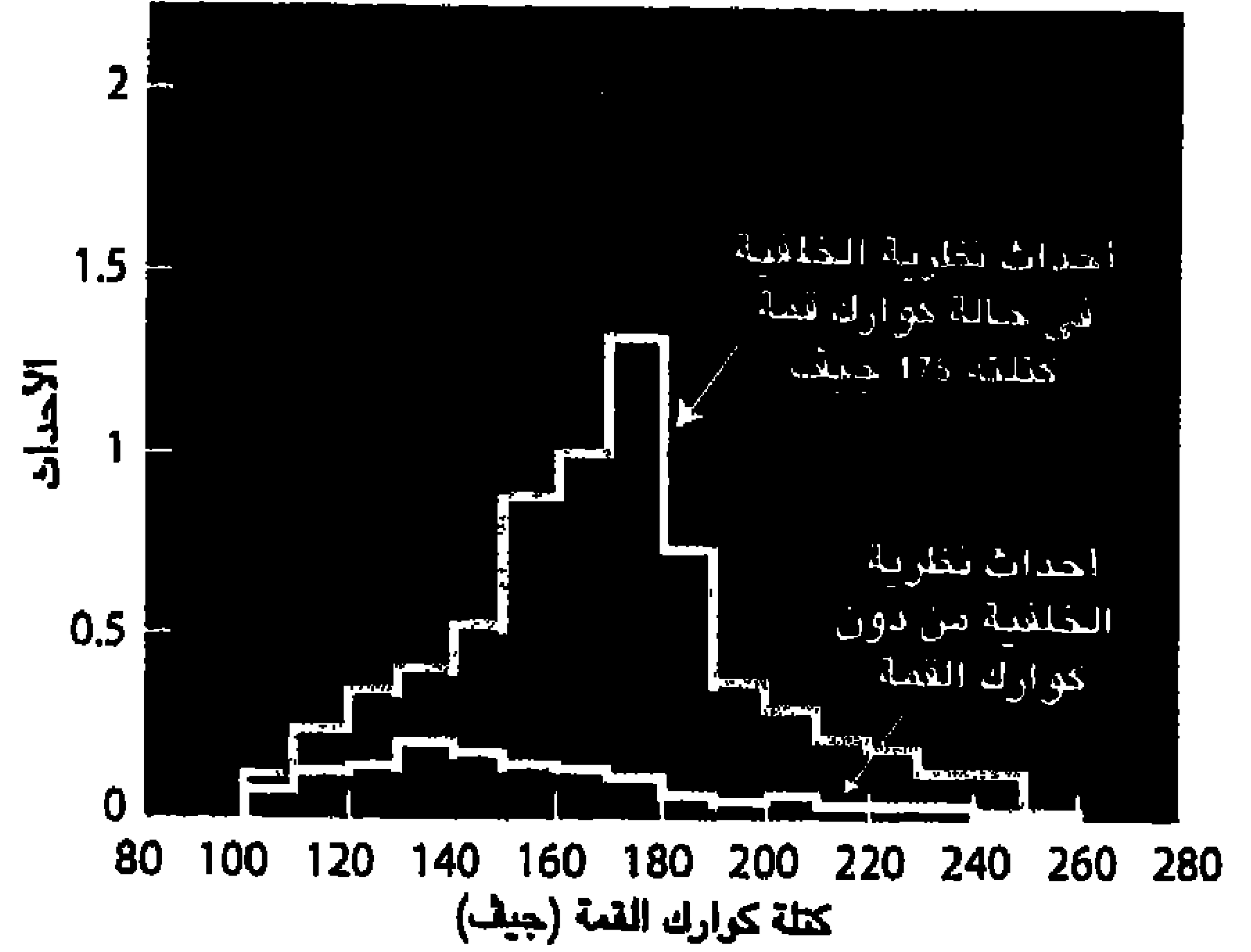
ومن أهم ما يلفت النظر في «حدث» فيه كوارك قمة هو النوافير الناتجة من كواركات القاعدة. يسير كوارك القاعدة في نافورة كجزء من ميزون أو باريون ثم يتفكك بعد نصف مليمتر تقريباً من النقطة التي أُنتج فيها. وقد بدأنا عام 1992 تقفي أثر جسيمات النوافير وتحديداً باستعمال جهاز خاص يوضع في رأس المنطقة التي تتصادم الحزم فيها. يستطيع الكاشف السيليكوني الرأسي تحديد مسار جسيم ما بدقة تصل إلى 15 ميكرون. وهكذا كنا نأمل أننا إذا وجدنا أغلب خطوط الحركة في نافورة ما، ثم مددنا هذه الخطوط نحو الوراء فإننا سنحدد نقطة انفكاك كوارك القاعدة وبالتالي تعرّفها كنافورة قاعدة.

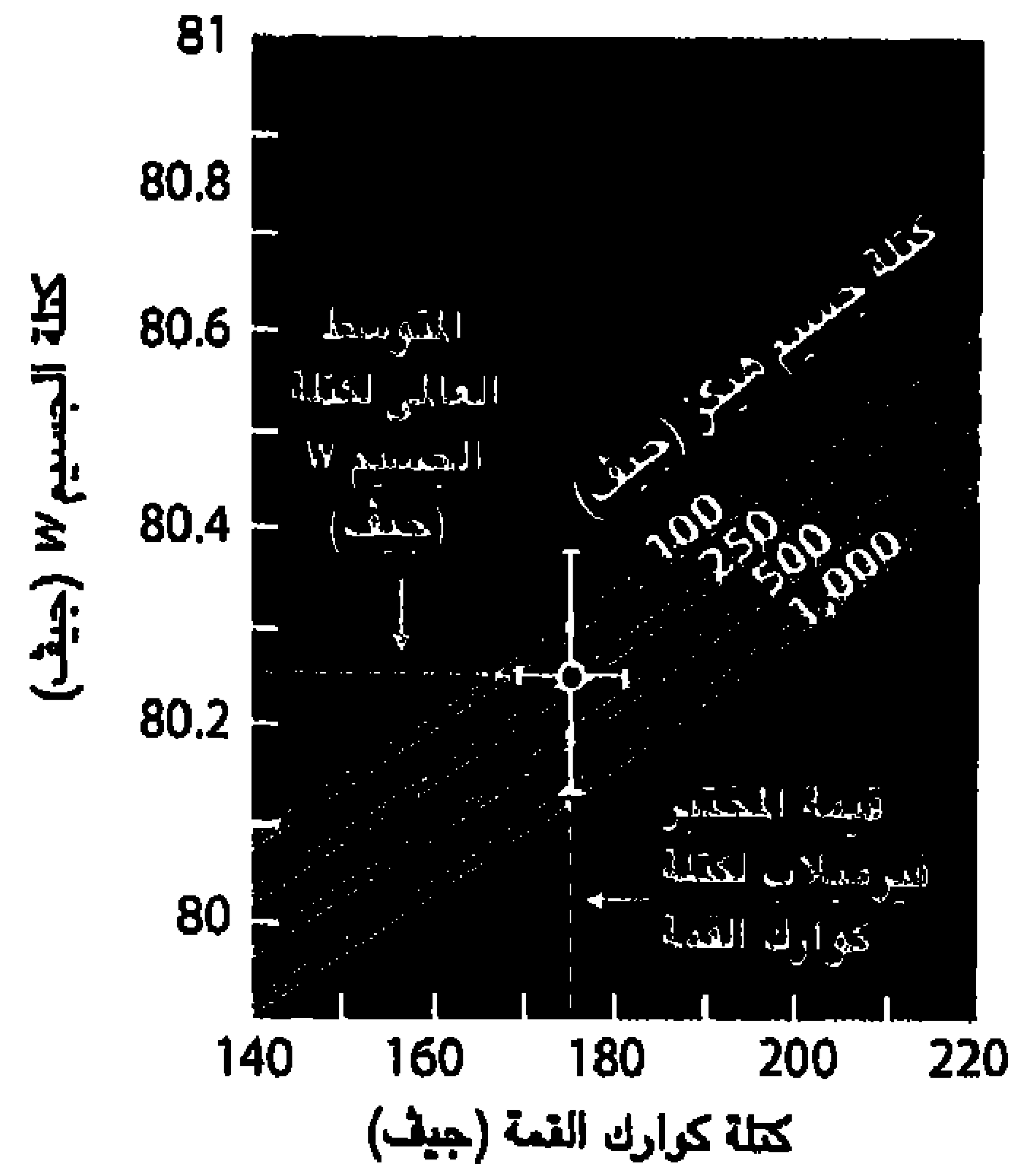
كانت تقنية السيلكون حديثة، وكنا قلقين من مفعول مرور آلاف بلايين الجسيمات عبره. كنا نعلم أن الكاشف قد يشوى بكامله في جزء من الثانية فيما لو وقع خلل في المسرّع جعله يصب الحزم في الكاشف. ولذا فقد وضعنا تصميماً خاصاً للحماية يدفع الحزمة بعيداً عن السيليكون كلما طرأت مشكلة ما. وفي الوقت الذي كنا نتعلم فيه كيفية استعمال الكاشف الرأسي الجديد كانت المجموعة DO تعد كاشفها الخاص على الطرف المقابل من حلقة المسرع.

وفي الشهر 1992/10، أي بعد ثلاثة أشهر، رأينا الإشارة الأولى لكوارك القمة، وهي عبارة عن حدث يتميز بإلكترون وميون يتمتعان بطاقة عالية وبنقص شديد في العزم وبوجود نافورتين على الأقل. حلّلنا هذا الحدث بتفصيل مفرط وخلصنا في النهاية إلى أنه من المحتمل أن يكون هو الشيء المرتقب. لاحظت المجموعة DO حدثاً مماثلاً ووجدتْ أن التفسير الأكثر احتمالاً له يتضمن كوارك قمة. ولكن حدثاً وحيداً لم يكن كافياً؛ كنا بحاجة إلى ملاحظة كوارك القمة بطرق مختلفة وعديدة حتى نتأكد من عدم وقوعنا في الخطأ الناتج من أحداث «خلفية» تقلّد عشوائياً توقيع كوارك القمة. وبدأنا بتحليل البيانات بهمة كبيرة، ولما لم يظهر شيء جديد عرفنا أن علينا أن نعمل مدة طويلة.

كانت هناك ثلاث مجموعات تحلل نتائج المجموعة CDF. إن المرشح الأول لكوارك القمة وجدته مجموعة تبحث عن أحداث تحتوي على ليبتونين (ناتجين من انحلال جسيمين W) ونافورتين على الأقل (ناتجتين على ما يظن من كواركات القاعدة). أما المجموعتان الأخريان فكانتا تعاينان أحداثاً تحتوي على ليبتون واحد (ناتج من تفكك جسيم W) إضافة إلى نوافير (ناتجة من تفكك الجسيم W الآخر وكواركات القاعدة). إلا أن استراتيجية هاتين المجموعتين لتمييز أحداث كوارك القمة كانت مختلفة. فبينما استخدمت إحداهما إشارات في غرفة السيلكون الرأسي والتي كانت تعمل بشكل جيد للغاية لتعرّف نوافير كوارك القاعدة، قامت المجموعة الثانية بالبحث عن ليبتونات ضعيفة الطاقة كدليل مؤشر إلى اضمحلال كوارك القاعدة.

وقد دُفع في هذا السباق الذي دام نحو عام بحدود الكتلة إلى 108 جيف من قبل المجموعة CDF، ومن ثم إلى 131 جيف من قبل المجموعة DO وبقينا نتابع البحث. وبعد ذلك وفي الشهر 1993/7 عرضت المجموعات الثلاث نتائج تحليلاتها المستمرة في اجتماع حضره جميع أعضاء المجموعة CDF. كانت هذه النتائج غامضة كلاً على حدة، ولكنها مجتمعة أعطت الدليل المقنع على وجود كوارك القمة. كان أحد كاتبي المقال (تيبتون) يستعد للذهاب إلى مؤتمــر يقدم فيه آخر نتائجنا، وقد بدا لنا واضحاً بعد هذا الاجتماع





كتلة كوارك القمة، وقد أعيد تركيبها (الشكل العلوي) من 12 حدثاً بدئياً في مجموعة CDF حول القيمة 175 جيف. ولكن الدقة التي نعرف بها كتلتي كوارك القمة والجسيم W غير كافية (الشكل السفلي) للتنبؤ بكتلة جسيم هيغز، ويمكن أن تتغير من 100 إلى 1000 جيف.

أننا لو تقدمنا بنتائجنا إلى المؤتمر لاستنتج الحاضرون أن لدينا أدلة قوية على وجود كوارك القمة. ولكن عمَلنا لم يكن جاهزاً لمثل هذا الفحص القاسي. لذا ركّز تيبتون في كلمته على الطرق والصعوبات المختلفة التي تعترض البحث عن كوارك القمة ولم يعط النتائج الأخيرة. وأخذت الشائعات تروج، بعضها الآخر في غاية الدقة وبعضها الآخر بعيد تماماً عن الواقع. ولم نساعد من جهتنا على وضع حد لهذا كله عندما ألغينا في ربيع 1994 كلمتنا المقررة في جدول أعمال أحد المؤتمرات الكبيرة.

عزلنا من بين نحو ألف بليون من التصادمات التي تحققت في المجموعة SDF اثني عشر تصادماً فقط، اشتبهنا باحتوائها على تكوين زوج من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد. ولكن كان من الممكن لعمليات فيزيائية أخرى تقليد توقيع حدث من هذا النوع، وكان علينا إذاً تقدير احتمال وقوعها. ووصلنا بعد شهور من الجهد إلى تقدير وقوع 5.7 حدث خلفي. أما احتمال كون الخلفيات وحدها مسؤولة عن الاثني عشر حدثاً فقد كان 1 من 400، وهذا يعني أن فرصة عدم ملاحظة كوارك القمة ضعيفة جداً.

أخضعنا الاثني عشر حدثاً إلى فحص واف، وتركّزت إحدى الدراسات على «إعادة بناء» كتلة كوارك القمة. يمكن بجمع كل الطاقات في النوافير والليبتونات الصادرة عن زوج مفترض يتكون من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد معرفة قيمة كتلة كوارك القمة. فإذا كانت الأحداث ناتجة فعلاً من زوج من هذا القبيل فلا بد أن تكون الكتل المشتقة منها قريبة من قيمة واحدة – كتلة كوارك القمة الحقيقية. وعلى العكس من ذلك فإن أحداث الخلفية ستعطي توزيعاً أوسع بكثير. وقد تجمّعت الكتل في الواقع في مدى ضيق يشير إلى أن كتلة كوارك القمة هي 175 جيف. وقد بدا لكثير منا أن هذا برهان مقنع على عدم وقوعنا في خطأ أحداث الخلفية.

خططنا لكتابة أربع مقالات، مقالة لكل نوع من التحليلات ومقالة تلخص النتائج. وقدمت المجموعات الأربع مقالاتها إلى الجمع العام للفريق، الذي أطلقنا عليه فيما بيننا اسم مذبحة أكتوبر (تشرين الأول) ــ فقد كان النقد جهوراً ومحقاً، لأن المقالات لم تكن وافية ولم تعطِ صورة متسقة. تخلينا عن فكرة المقالات الأربع وبدأت مجموعة صغيرة (ضمتنا نحن الاثنين) بالعمل عوضاً عن ذلك على كتابة مقال واحد.

كانت السيرورة مضنية، فلكل فرد من الفريق رأي مخالف فيما يتعلق بقوة ادعائنا. ومن الصعب طبعاً إرضاء 400 ناشر. إضافة إلى ذلك، في حين كنا ننجز عملنا بعد عدة أشهر من الجهد، أخذنا نتلقى تصحيحات من فيزيائيين لا ينتمون إلى الفريق ولا يفترض فيهم أن يكونوا على اطلاع على المسودات إطلاقاً. وبعد أخذ وردّ قرر الفريق أن تُعلن النتائج لا على أنها اكتشاف وإنما كدليل على وجود كوارك القمة. وعندما طرحنا ورقتنا للنشر في 1994/4/22، رأى الكثيرون منا أنها مقالة جيدة جداً وحصيلة سيرورة ديمقراطية ممتازة أملْنا ألا تجبرنا الظروف على تكرارها.

خبأنا المسودات والمراجع في ملف ثانوي Subdirectory في حاسوب سكرتيرتنا تحت اسم «بوت» (وتعني بالعربية قدر)، وكما هو متوقع فإن هذه المحاولة الضعيفة للكتابة المرموزة لم تحم أسرارنا البتة. قبل إعلان النتائج علق زميلان من حملة الدكتوراه الجدد مقالاً نظرياً ساخراً على اللوحة الإخبارية الإلكترونية «تنبأ» فيه استناداً إلى نظرية غريبة بكتلة كوارك القمة ــ وهي قيمة المجموعة CDF إلى آخر رقم بعد الفاصلة ــ كما أشارا إلى استعدادهما لقبول عروض عمل.

عقدنا حلقة دراسية ومؤتمراً صحفياً في فيرميلاب بعد بضعة أيام من عرضنا مقالة المجموعة CDF للنشر أعلنّا فيهما نتائجنا. وقدمت المجموعة DO نتائجها أيضاً، ومع أن هذه النتائج جاءت منسجمة مع نتائج المجموعة CDF فإنها لم تأت ببراهين دامغة على وجود كوارك القمة، ماعدا حدثاً شاذاً وحيداً سُجل في بدء السباق. كما أن الفريق DO افترض لكتلة القمة قيمة منخفضة منعته من تعميم أسلوب البحث عنه على النحو الأمثل.

أنهى الفريق DO خلال أسابيع إعادة تحليلاتهم (لكوارك قمة أثقل) ولاحظوا فعلاً ما يشير إلى وجوده. وعاد الفريقان في هذه الأثناء إلى جمع بيانات أخرى. فقد كنا نحتاج إلى تأكيد ما وصلنا إليه إلى ضعف أحداث كوارك القمة على الأقل. ركّب الفريق CDF كاشفاً سيليكونياً رأسياً جديداً، إذ تضرر الكاشف القديم بفعل الإشعاع، وكان علينا مرة أخرى أن نتعلم حيله الخاصة. وكان هذا التجهيز في النهاية أفضل من سابقه. كتبنا خوارزمية (نظام حساب) جديدة لاستعمال الكاشف الرأسي في الكشف عن مرشحي كوارك القمة مستفيدين في ذلك من خبرتنا السابقة. وعندما تجمع لدينا ما يكفي من البيانات أخضعنا المعلومات إلى الخوارزمية المكملة. واتضح لنا على الفور أن كوارك القمة موجود فعلاً.

أعطت العروض الأخيرة التي قام الفريقان بتقديمها في الشهر 1995/3 دليلاً فائضاً يؤيد وجود كوارك القمة. فقد ذكر الفريقان CDF وDO أن احتمال تفسير مرشحيهما لكوارك القمة باللجوء إلى الأحداث الخلفية وحدها هو أقل من واحد على 500000.

استطعنا بعد هذا التاريخ مضاعفة عدد بياناتنا تقريباً، وحصلنا على ما ينوف على مئة حدث كوارك قمة جديد. كما قمنا ببعض البحوث التمهيدية لوقائع تتجاوز المنوال المعياري. توحي الكتلة الهائلة لكوارك القمة ــ قيمتها الحالية هي 175.6 جيف ــ بالظن أن هذا الكوارك قد يكون مختلفاً كلياً عن الكواركات الخمسة الخفيفة. وهنا يكمن الأمل في تجاوز المنوال المعياري؛ إذ إن هذا المنوال وعلى الرغم من نجاحه الباهر، يترك أسئلة عديدة من دون جواب.

يوحد المنوال المعياري التفاعل الضعيف، الذي تؤدي فيه بوزونات W وZ دور الوسيط والتفاعل الكهرمغنطيسي، الذي ينقله الفوتون، في تفاعل واحد «كهرضعيف» وذلك في مجالات الطاقة العالية جداً. وجدت هذه الطاقات فعلاً في بداية تكوين الكون. ولكن هذين التفاعلين يختلفان تماماً في سلوكهما في عالم الطاقات المنخفضة الذي نعيش فيه ونحن لا نعرف شيئاً عن آلية «كسر» تناظرهما في البداية، ويُفسَّر كسر التناظر في أبسط المناويل بوساطة جسيم جديد يسمى جسيم هيكز Higgs.

عند الطاقات العالية حين يوجد التناظر فإن الجسيمات W وZ والفوتون واللبيتونات والكواركات كلها عديمة الكتلة. ولكن عند الطاقات المنخفضة ينكسر التناظر وتتفاعل جسيمات W وZ مع جسيمات هيكز وتكتسب كتلة. كما تكتسب الكواركات واللبيتونات كتلاً في هذه السيرورة. وبينما يسمح المنوال المعياري بحساب كتل الجسيمات W وZ، فإن كتل اللبيتونات والكواركات تضاف اعتباطاً بوساطة بارامترات Parameters يمكن تعديلها؛ وذلك لكي يتم توصيف شدة تفاعل كل نوع من الكواركات واللبيتونات أو كيفية «اقترانها» بجسيم هيكز.

إن شدة تفاعل الإلكترون وهو خفيف جداً هي 3×10^{-6}، وشدة التفاعل تكاد تساوي الواحد تماماً لكوارك القمة. فهذا الاقتران بجسيم هيكز القوي نسبياً وكذلك الغموض والتوقير اللذين يصاحبان الرقم واحد، تؤذن بالتكهن أن لكوارك القمة دوراً خاصاً لا نعرفه بعد. لا شك أن القيمة الكبيرة لكتلة كوارك القمة تجعل منه أكثر الكواركات تأثيراً في تفاعله مع الجسيمات الأخرى، فقد يقود القياس الدقيق لكتلتي كوارك القمة والجسيم W مثلاً إلى التنبؤ بكتلة جسيم هيكز.

هناك وسائل لكسر التناظر الإلكتروضعيف من دون اللجوء إلى جسيمات هيكز الأولية. ففي إحدى النظريات يحل زوج يتكون من كواركي القمة والقمة المضاد محل جسيم هيكز. وتتنبأ هذه النظرية بوجود جسيمات ثقيلة تتفكك إلى زوج من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد، وهذا سيؤدي بمثل هذا المفعول ــ إن وجد ــ إلى رفع نسبة إنتاج كوارك القمة.

فوق القمة:

إن مجرد ضخامة كتلة كوارك القمة تجعل من انحلاله أرضاً خصبة للبحث عن جسيمات جديدة. فقد جادل عدد من النظريين أن بعض الأحداث التي جمّعها الفريق CDF تحتوي على جسيمات فائقة التناظر. إن فائقية التناظر تناظر مفترض يقرن بكل جسيم في المنوال المعياري جسيماً مرافقاً لم يكتشف بعد. فلو وجدت جسيمات مرافقة وكانت أخف من كوارك القمة فستظهر عندئذ في أحداث يشترك فيها كوارك القمة. يمكن، على سبيل المثال، لكوارك القمة أن يتفكك إلى مرافقه فائق التناظر. أو أن الكلوينو (وهو المرافق المفترض للكلوون) سيتفكك إلى زوج من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد، وهذا ما تسمح به نظرية فائقية التناظر. وقد يكون من الممكن لهذين المفعولين أن يلغي أحدهما الآخر، ويؤديان إلى عدم تغيير الإنتاج الملاحظ لكواركي القمة والقمة المضاد.

إن نظرية فائقية التناظر تتنبأ بوجود أربعة جسيمات بدلاً من جسيم واحد. فلو وُجدت هذه الجسيمات وكانت أخف من كوارك القمة لعُثر على بعضها في تفكك كوارك القمة. وهكذا قام الفريقان CDF وDO بتجارب تبحث عن هذه الجسيمات المفترضة ولكن من دون جدوى حتى الآن.

هناك سؤال حاسم آخر عما إذا كانت الكواركات، ولا سيما كوارك القمة ذو الكتلة الهائلة، جسيمات أساسية ليس لها بنية داخلية. قاس الفريق CDF مؤخراً وتيرة إنتاج النوافير العالية الطاقة في مصادم مختبر فيرمي، ووُجِد أنها أعلى مما كان متوقعاً. يُلقي التبعثر العالي الطاقة وعلى زوايا عريضة، ضوءاً على البنية الداخلية للأشياء المتصادمة (وذلك على غرار تبعثر رذرفورد Rutherford Scattering الذي كشف النقاب عن وجود نواة الذرة). فأحد تأويلات نتائجنا أن التصادمات بين أشياء صغيرة داخل الكواركات هي المسببة للنوافير الإضافية — وهو ما لم تكشفه أي تجارب أخرى.

ولكن هذا الاستخلاص الجذري، الذي سيؤدي إلى تغيير كامل لنظرية الكواركات، لا يمكن البت فيه إلا إذا تمكنّا من دحض جميع الإمكانيات الأخرى. يمكن أن يتأتى «فائض» إنتاج النوافير عن سهو دقيق في التنبؤات. ونحن الآن في صدد سبر هذه الإمكانيات. وتسير البيانات الآن في اتجاه أحد هذه التفسيرات المملة، ولكننا ملزمون في الوقت الحالي بالقول إن كوارك القمة وعلى الرغم من ضخامة كتلته، هو في الواقع أساسي ولا أجزاء له.

والآن وقد جُدد مسرع فيرميلاب من جهة وحسّن كل من الفريقين CDF وDO كاشفه تحسيناً كبيراً من جهة أخرى، فإننا سنعود إلى جمع المعلومات في عام 1999. وسيسمح رفع مستوى المسرع بإنتاج كواركات القمة على وتيرة أعلى بعشرين مرة من السابق، كما أن رفع مستوى الكاشف سيحسن من فعالية تعرّف كوارك القمة. والحصيلة أن كلا الفريقين سيجدان كوارك القمة بسرعة أكبر بثلاثين مرة من السابق، وهذا يتيح لهما النظر بتفصيل أكبر إلى خواص كوارك القمة. سوف يباشر مصادم الهادرونات الكبير في سيرن SERN عمله في عام 2006، وسيُنتج حزمتين من البروتونات لتتصادما في طاقة 14 تيف(7) (Tera أو 10^{12} إلكترون فلط) — وهذا ما يعادل سبع مرات طاقة مختبر فيرمي — وتبعاً لذلك سيتم توليد زوج من كوارك قمة وكوارك قمة مضاد كل ثانية تقريباً.

وسيبدأ الفيزيائيون بعد بضع سنوات باستخدام كوارك القمة للإجابة عن أسئلة مازالت قائمة حول المادة والكواركات والقوى التي تتحكم في الطبيعة. أما عن ماهية المعتقد الفيزيائي الذي سيطلع علينا بعد ما نعرفه الآن فهو موضوع تكهنات نشيطة لن تتوقف إلا عندما تبدأ القياسات بكشف عمل الطبيعة.

المؤلفان

Tony M. Liss - Paul L. Tipton

ساعدا على بناء العناصر الأساسية لكاشف مصادم فيرميلاب (CDF)، وعملا منسقين لمجموعة البحث عن كوارك القمة. اشترك ليس في البحث عن أحادي القطب (مونوبول) عند تحضيره الدكتوراه في جامعة بيركلي بكاليفورنيا، والتحق عام 1988 بهيئة التدريس في جامعة إلينوي بأوربانا — شامبين وحصل على زمالة (ألفرد ب. سلون) عام 1990. أما تيبتون فحصل على الدكتوراه من جامعة روشيستر عام 1987 لدراسة كواركات القاعدة، وهو الآن عضو بهيئة التدريس فيها. كما أنه من حملة جائزة امتياز الباحثين المبتدئين التي تمنحها وزارة الطاقة في الولايات المتحدة وجائزة الباحثين الشباب التي تمنحها المؤسسة القومية للعلوم.

مراجع للاستزادة

Dreams Of A Final Theory. Steven Weinberg. Pantheon Books, 1992.

Observation Of Top Quark Production In pp Collisions With The Collider Detector At Fermilab. F. Abe et al. in *Physical Review Letters*. Vol. 74, No. 14, Pages 2626 - 2631; April 3, 1995.

Observation Of The Top Quark. S. Abachi et al., ibid., Pages 2632 - 2637.

Top - Ology. Chris Quigg in Physics Today, Vol. 50, No. 5, Pages 20 - 26; May 1997.



(7) Tera - Electronvolt: Tev

المكشاف السيليكوني المكروي الشريط

إن هذه المكشافات المنتَجة بوساطة الأدوات المستخدمة في تصنيع الدارات المتكاملة، قد ساعدت حديثاً في العثور على «كوارك القمة»، وهي أساسية لتجارب أخرى مهمة.

(أم. لتكه). (أس. شفارتز)

ربما يبدو الكشف عن بوزون هيكز، الجسيم الممتنع عن الكشف الذي يعتقد بأنه يضفي الكتلة على المادة، مشابهاً لهذه المحاكاة الحاسوبية لحدث ما في مصادم الهادرونات الكبير في المركز CERN. فالبروتونات التي تسحق بصدمها ببروتونات قد تولد جسيم هيكز الذي يتفكك إلى أربعة جسيمات أخرى تدعى (ميونات) Muons (الخطوط الصفراء)، وستتولد كذلك مئات من جسيمات الخلفية (الحمراء)، التي يجب فصلها عن المسارات القليلة موضع الاهتمام. وستسجل الطبقات الأسطوانية الست (الخطوط البيضاء) من المكشافات السيليكونية المكروية الشريط والمكشافات العنصورية[1] المتراكزة[2] مع منطقة التصادم، الموضع الذي تمر به الجسيمات المشحونة خلال طبقات المكشافات هذه. وهذه المواضع مجتمعة، مع تلك الناجمة عن صف خارجي من مكشافات غازية (النقط البيضاء) تأذن بإعادة التشكيل الدقيق للمسارات.

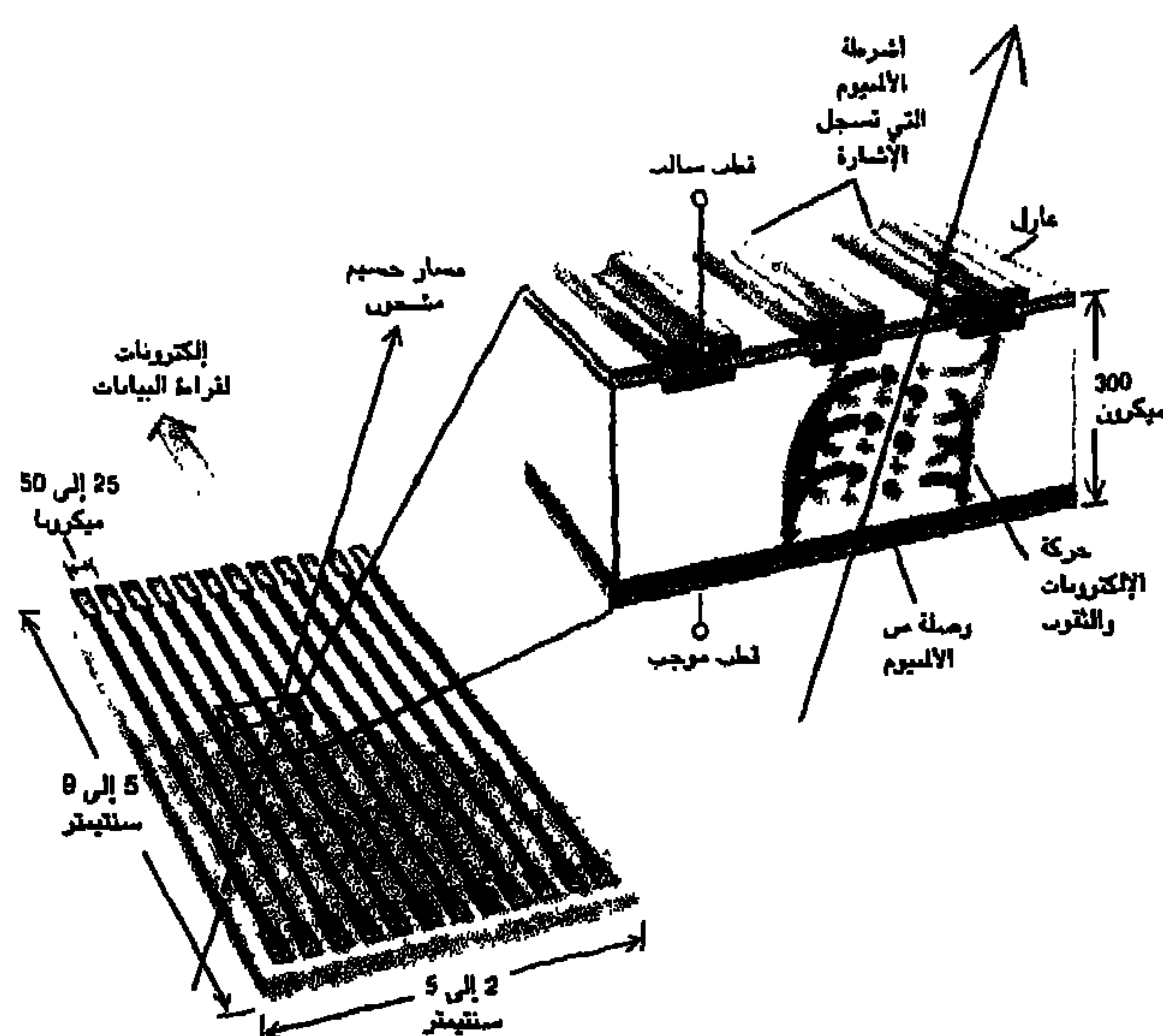
عُرف السيليكون، إكسير ثورة الإلكترونيات، منذ زمن طويل كمادة ذات قابلية تكيف غير عادية. فالآن، بعد نحو نصف قرن من الاكتشافات التي بشّرت أخيراً بعالم اليوم من الحواسيب ذات القدرة غير المحدودة، وتقانات الاتصالات، والخلايا (الفوتوفلطية) Photovoltaic، تبدو هذه المادة المتعددة الاستعمالات متجهة نحو آفاق بارزة. والسنوات المقبلة تعدُ (بشيبات) Chips ستجعل الإلكترونيات تتبادل المعلومات مع الأعصاب البشرية وتجعل الآلات الدقيقة قادرة على أداء مهام جراحية مكروية.

ومازال تطبيق آخر، مثير للدهشة، يتمثل في كشف الجسيمات المشحونة، حيث يُستخدم ما يشبه المجاهر التي تعتمد على السيليكون للتحديق في المكنون الداخلي للمادة. فبعد انقضاء خمسة عشر عاماً في التصنيع، مكّن المكشاف (الكاشف) السيليكوني

---

(1) Pixel Detectors.

(2) متحدة المركز Cocentric. (المحرر)



يولد الجسيم المشحون المار خلال أحد المكشافات المكروية الأشرطة إشارة على واحد أو أكثر من أشرطته المتوازية، وأثناء اجتياز الجسيم للسيليكون، يولد فيه أزواجاً من الشحنات الموجبة والسالبة في أنبوب دقيق على مساره. وتحت تأثير حقل كهربائي داخلي تساق الشحنات السالبة ـ الإلكترونات ـ بسرعة نحو القطب الموجب، في حين تساق الشحنات الموجبة أو «الثقوب» ـ وهي المواضع المميزة بغياب الإلكترون ـ في الاتجاه المضاد. وتولد حركة الإلكترونات والثقوب الإشارات على الأشرطة المجاورة.

المكروي (الصغري) الشريط الفيزيائيين من قياس مواضع الجسيمات في حدود 10 (ميكرون) Microns أو أقل. وقد فتحت هذه الدقة ـ الأحسن بعشر مرات على الأقل مما تم تحقيقه حتى الآن بالتقانات الإلكترونية لكشف الجسيمات ـ إمكانات تجريبية جديدة في فيزياء الجسيمات وحقول علمية أخرى.

فعند تلاقي التقانة العالية مع فيزياء الطاقة العالية تساعد هذه المكشافات (الكواشف) الباحثين على التأكد من وجود (كوارك القمة[3]) Top Quark الذي طال البحث عنه. وليست الجهود التي اكتملت حديثاً لبرهان وجود ذلك الجسيم بشكل قاطع سوى أحد عدة مشروعات تستخدم هذه المكشافات لمعالجة معضلات أساسية كانت ستصبح عصية الحل من دونها. وكان من أبرز هذه المحاولات البحث عن (بوزون هيكز) Higgs Boson، وهو الجسيم الغامض الذي يستعصي كشفه والذي يعتقد الفيزيائيون بأنه يضفي على المادة كتلتها.

فضلاً عن ذلك، فإن قصتنا تمتد إلى ما هو أبعد من فيزياء الجسيمات. ويعود الفضل في ذلك إلى تقانة السيليكون الغنية المتعددة الاستعمالات، حيث برزت أنواع جديدة من المكشافات لمختلف أغراض التطبيق العلمي. وثمة استعمالات ممكنة ، هي قيد المتابعة الناشطة، تمتد من الدراسات الفلكية بوساطة الأشعة السينية وأشعة غاما إلى (التصوير الطبي) Medical Imaging، وفي الحقيقة يمثل المكشاف المكروي الشريط جزءاً من ثورة واسعة في التصوير العلمي، تعتمد فيه التقانة الحديثة لأشباه الموصلات على كشف الضوء، والأشعة السينية (X)، والجسيمات المشحونة، وحتى على كشف الإشارات الفسيولوجية العصبية. وبذلك توضح المكشافات بشكل رائع التضافر المزدهر بين العلم والتقانة.

كيف تعمل المكشافات المكروية الأشرطة:

تكشف الجسيمات في المكشاف السيليكوني المكروي الشريط بوساطة ديودات (صمامات ثنائية) Diodes إلكترونية «ذات اتجاه واحد» تسمح للتيار بالمرور في اتجاه دون الآخر. إن المقدرة على وقف تدفق التيار هي السبب الوحيد في استخدام الديود كعنصر للكشف، وإلا فإن التأرجحات الإحصائية في تدفق تيار كبير ستطغى على الإشارات الضعيفة نسبياً الناجمة عن الجسيم الذي هو قيد الكشف.

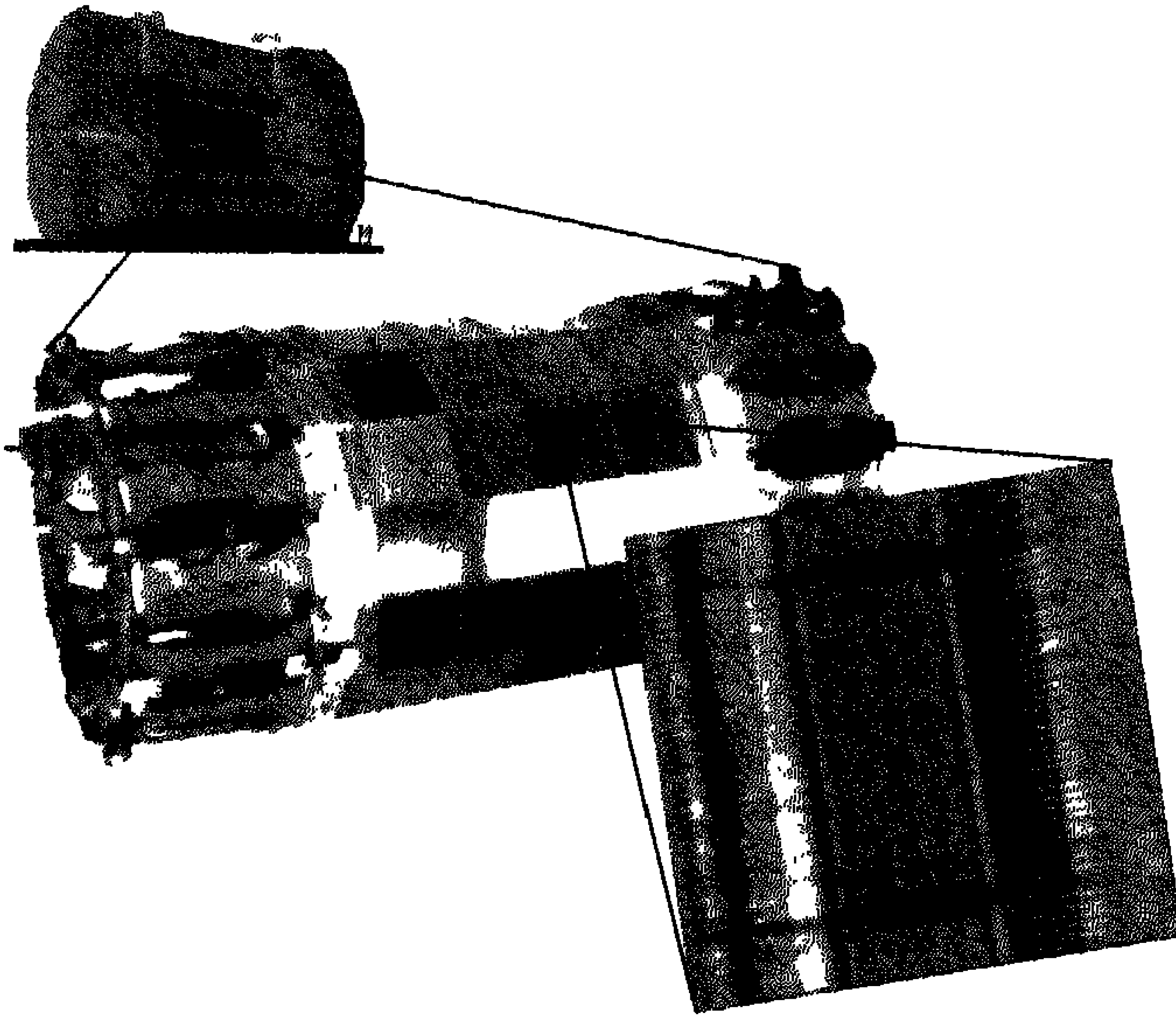
وباستخدام طرائق تصنيع الدارات التكاملية، ترسّب الديودات على (رقائق) Wafers من السيليكون. وهذه يمكن أن تهيّأ في الغالب بأي نمط هندسي، لكنها تصنع في العادة على شكل أشرطة متوازية، كل منها يمثل ديوداً طوله عدة سنتيمترات. والمسافة النموذجية بين شريط وآخر هي 25 ميكروناً، بدقة تبلغ جزءاً صغيراً من الميكرون.

وعندما يمر جسيم مشحون في رقيقة ما، أو حين يمتص شعاع X داخلها، تتولد إشارة كهربائية في عدد صغير من الأشرطة، وهـذه تكشـف ـ بدقة تصل إلى جزء صغير من المسافة الفاصلة

---

[3] الكواركات هي إحدى الأسر الرئيسية للجسيمات الأولية، وهي ذات تفاعلات قوية. ويسمح الميكانيك اللوني (الكروموديناميك) الكمومي Quantum Chromodynamics بوجود نحو 18 نوعاً (نكهة) من هذه الكواركات، منها: الكواركات العلوية، السفلية، المفتونة، الذروية (القمة)، القعرية (القاع) والغريبة. ويرمز إليها على التوالي بـ: b, t, c, d, u و s. وأول من أطلق هذا الاسم على الجسيمات، هو عالم الفيزياء النظرية (كيل ـ مان). ويقال إنه استقاها من رواية الكاتب الإيرلندي جيمس جويس، الذي كان قد استخدمها ككلمة سر من دون معنى.

يقع كاشف الذروة المصنوع من السيليكون في مركز نظام أكبر بكثير مكون من مكشافات الجسيمات يدعى آلِف (في الأعلى). فالحزم تصدم مركز كاشف الذروة (في الأسفل) صدماً مباشراً داخل وحدات المكشاف المكروي الشريط المشكلة في هيئة مجموعتين أسطوانيتي الشكل متحدتين في المحور. وكل وحدة تتكون من أربع رقائق من السيليكون تتحسس بالجسيمات، ومن عدة شيبات تضخيم ملتصق بعضها ببعض بوساطة آلاف الأسلاك (في اليمين). ولا تظهر في هذه الصورة أشرطة الكشف المفردة على رقيقة السيليكون.



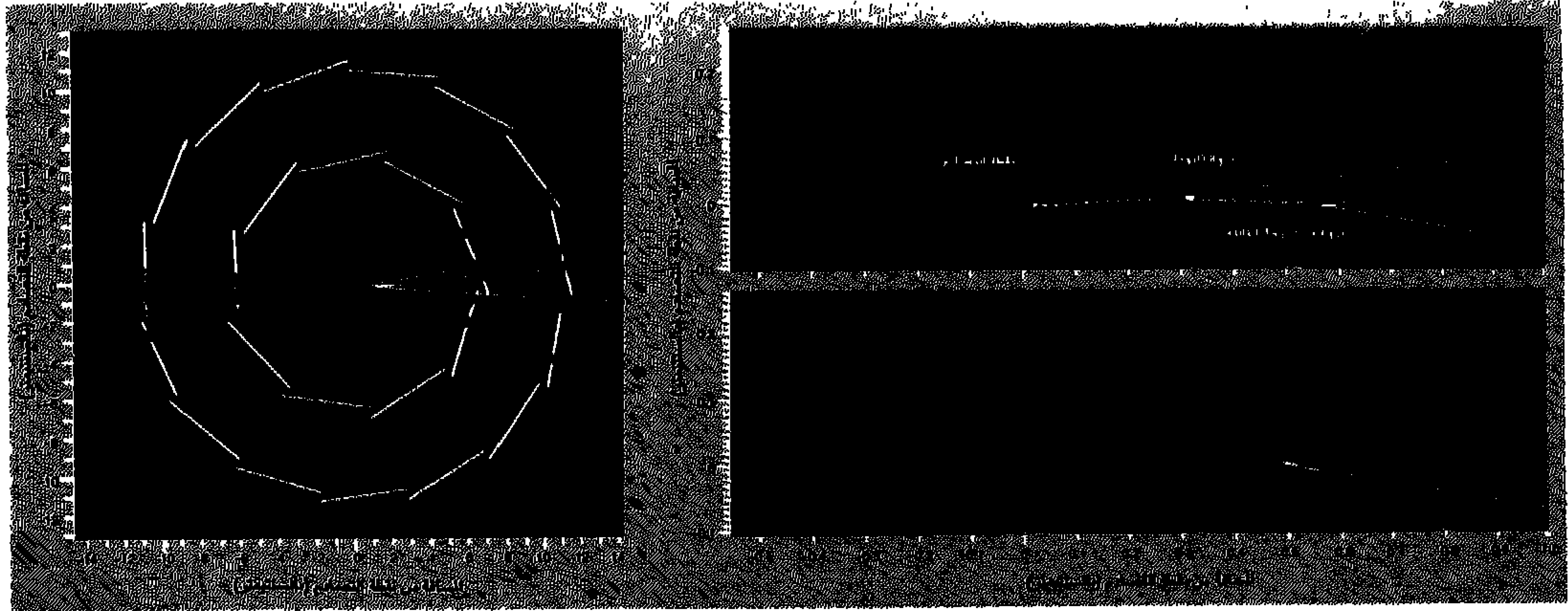
بينها ـ الموضع الذي سقط فيه الجسيم على الرقيقة في اتجاه معين. وتبلغ قدرة الميز (الفصل) Resolution في حالة المسافة النموذجية المذكورة بين الأشرطة ما بين خمسة و10 ميكرون. ويعمل الباحثون ـ في معظم التجارب الأساسية حالياً ـ على تطوير أدواتهم باستخدام مكشافات ذات أشرطة على وجهي الرقيقة، بحيث توضع الأشرطة على أحد الوجهين بزاوية ما مع الأشرطة الموضوعة على الوجه الآخر (أو تلصق رقيقتان إحداهما بالأخرى حسب الشكل الأساسي نفسه). إن هذه المكشافات المكروية الأشرطة على الوجهين تعطي إحداثيين مستقلين لكل موضع صدم محددةً بذلك نقطة معينة في الفضاء.

ولتحويل قطعة من السيليكون الخام إلى أداة دقيقة، ثمة حاجة إلى معالجة خاصة. فقدرٌ ضئيل من الفسفور هنا، ووابل من البورون هناك وعدد من المكونات الأخرى المختارة، تغيّر بشكل خفي، بل جوهري الخصائص الكهربائية للسليكون. وتكمن نقطة البداية في رقيقة صغيرة من السيليكون المتبلور يبلغ سمكها نحو 300 ميكرون، وقطرها 10 سنتيمتر. ولبلّورة السيليكون بنية الألماس، حيث لكل ذرة أربع ذرات مجاورة متساوية البعد عنها، وهي تشارك في كل من إلكتروناتها الخارجية الأربعة ذرة من الذرات المجاورة.

ويتم (حقن) Dope هذا السيليكون النقي تماماً بشكل خفيف (بذرة شائبة) Impurity Atom كالفسفور الذي يملك خمسة إلكترونات خارجية. (ونقصد بالضبط «بشكل خفيف» أن هناك ذرة شائبة واحدة لكل 50 بليون أو نحو ذلك من ذرات السيليكون). وكما هي حال ذرات السيليكون، تشارك كل ذرة من ذرات الفسفور في (الشبيكة) Lattice البلورية بأربعة من إلكتروناتها الخارجية مع أربع ذرات مجاورة. أما إلكترون ذرة الفسفور الخامس فيتحرر بعد ذلك بسهولة ليحمل تياراً كهربائياً. ولذلك يُعرف مثل هذا النوع من الحقن بالنوع n، حيث تشير n إلى الشحنة (السالبة) Negative التي يحملها الإلكترون الحر.

وبمجرد تحضير رقيقة مشابة بشكل صحيح، تكفل طرائق سائدة في مهنة الدارات التكاملية (كالتصوير الليثوغرافي) Photolithography و(الزرع الأيوني) *Ion Implantation*، وضع مئات، وحتى آلاف الأشرطة عليها. ويتم تشكيل كل شريط بزرع خط من الذرات الشائبة تحت سطح الرقيقة بعرض ما بين خمسة إلى 10 ميكرون وبسمك يبلغ 0.05 ميكرون. وللذرات الشائبة، كالبورون، المستخدمة في عملية الزرع هذه ثلاثة إلكترونات خارجية. وهذا أمر مهم لأنه بإحلال ذرة البورون محل ذرة سليكون في الشبيكة البلورية، تكتسب على الفور إلكتروناً رابعاً من خلال الارتباط بالذرات الأربع المجاورة. واكتساب مثل هذا الإلكترون الإضافي يؤدي إلى غياب الإلكترون، أي تكوُّن «ثقب» Hole في مكان آخر من البلورة. والسيليكون المحقون بهذه الطريقة ـ بالذرات الشائبة ذات ثلاثة إلكترونات خارجية ـ يدعى النوع p، لأن حامل الشحنة المتوافر، وهو الثقب، هو في الواقع جسيم ذو شحنة (موجبة) Positive.

ولهذا، فإن الديود يتألف من مادة من النوع p، ومادة من النوع n وحد فاصل أو «وصلة» *Junction* بين الاثنين. وفي المنطقة التي تكوِّنها هذه الوصلة، تنتشر الإلكترونات من مادة النوع n إلى مادة النوع p، مما يتسبب في معادلة شحناتها من قبل الثقوب مُخلِّفة وراءها ذرات شائبة متأينة على جانبي الوصلة. (ولانتشار الثقوب من منطقة النوع p إلى منطقة النوع n الأثر نفسه). وتؤدي هذه الذرات المشحونة الثابتة إلى توليد حقل كهربائي يعمل كحاجز يميل



يسجل العمر القصير للجسيم في منظومة آلف بوساطة حلقات من مكشافات السيليكون المكروية الأشرطة، المتحدة في المركز، وهي المبينة في الصورة أعلاه كخطوط بيضاء. وتدل المربعات الحمراء على المواضع من المكشافات التي اخترقت فيها الجسيمات المشحونة (الخطوط الملونة)المكشافات فخلفت إشارة. ومثل هذه الجسيمات تم توليدها عن طريق الإفناء العنيف لإلكترون ومضاده في مركز الحلقات. وكما هو مبين في الصورة المكبرة (في الأعلى)، فإن أحد نواتج الإفناء هو جسيم يتفكك إلى جسيمات أخرى عند ذروة ثانوية، وأحد الجسيمات يتفكك بدوره إلى عدد أكبر من الجسيمات عند ذروة من الدرجة الثالثة. ومن دون هذه البيانات من المكشافات المكروية الأشرطة (في الأسفل)، لا يمكن بناء المسارات بدقة تكفي لتحديد النتاج الأول ونقاط التفكك التالية.

إلى إبقاء الثقوب في الجهة p والإلكترونات في الجهة n. وفي المحصلة النهائية تتكون عند الوصلة منطقة نضوب (استنفاد) Depletion رقيقة خالية من أي حاملات شحنة، لكنها تحتوي على (حقل كهربائي) Electric Field قوي. ومنطقة النضوب هذه إذا ما تم توسيعها بقدر مناسب، تصبح المنطقة التي يتم فيها كشف الجسيمات عندما يكون الديود جزءاً من المكشاف المكروي الشريط.

ومن أجل كشف الجسيمات المشحونة والأشعة السينية بشكل فعال، يجب أن تكون منطقة النضوب هذه عميقة بالقدر الممكن عملياً. فالعمق الإضافي يعني مساراً أطول يولّد خلاله الجسيم المشحون إشارة بفعل اجتيازه الرقيقة، متيحاً بذلك الفرصة لإشارة أقوى. أما في حالة الأشعة السينية فتكون زيادة الكفاءة في الكشف ناتجة من وجود مادة أكثر لتحقيق الامتصاص.

والتأثير في الديود بفلطية ذات قطبية مناسبة يزيد من عمق منطقة النضوب. وفي المكشاف المكروي الشريط يثبَّت قطب سالب إلى شرائط النوع p، ويثبَّت قطب موجب إلى (الركيزة) Substrate من النوع n. وتحت تأثير الفلطية يتم سوق حاملات الشحنة بعيداً عن الوصلة مما يؤدي إلى توسع في منطقة النضوب.

تكون منطقة النضوب في الديود جاهزة للعمل كمكشاف جسيمات. فعندما يمر جسيم مشحون خلالها يتفاعل كهربائياً مع الشبيكة، معطياً طاقة ومحرراً أزواج إلكترونات ــ ثقوباً في عمود دقيق على مساره. وتحت تأثير الحقل الكهربائي المتكون بفعل الذرات الشائبة المتأينة تنحرف الإلكترونات والثقوب في اتجاهين متضادين بحيث تكون حركة الثقوب نحو الأشرطة. وتولد حركة حاملات الشحنة هذه إشارة كهربائية على واحد أو عدد من الأشرطة القريبة. فضلاً عن ذلك، ولكون هذه الحاملات المتحررة بفعل الجسيمات الواردة لا تنحرف إلا مسافة قصيرة فقط. فإن الإشارة تتولد خلال 20 جزءاً فقط من البليون من الثانية أو نحو ذلك.

وبمجرد تولد هذه الإشارات، يجب تكبيرها وتسجيلها قبل استخدامها لتحديد نقطة معينة على مسار الجسيم. ويتم القيام بهذه الوظائف الحاسمة بوساطة شيبات قراءة إلكترونية خاصة مجهزة بصف من دارات تضخيم ذات كثافة تقارب كثافة الأشرطة الموجودة على رقيقة المكشاف. ومن خلال طريقة خاصة بوصل الأسلاك يتم وصل كل شريك من الأشرطة الموجودة على المكشاف بوساطة الأمواج فوق الصوتية بالمضخم الخاص به الموجود على شيبة قراءة البيانات، وذلك عن طريق سلك من الألمنيوم يبلغ سمكه ربع سمك شعرة الإنسان.

ونتيجة لمثل هذه التفاصيل تجيء قدرة الميز المكاني الفائقة للمكشافات المكروية الأشرطة ــ التي ما هي إلا سبب وجودها نفسه. وقبل أن تصبح هذه المكشافات متوافرة في الثمانينيات، كان الرصد الجسيمي يتم إلكترونياً بتأيين غاز في حين كان كشف الإشارات يتم بوساطة سلك موصل. ومازالت حجرات الغاز التي تستخدم الأسلاك، المطورة منذ 27 سنة جزءاً مهماً من كل التجارب الحالية والمستقبلية لفيزياء الطاقة العالية، حيث كان اختراعها حدثاً أساسياً أكسب (ج. شارباك) جائزة نوبل في الفيزياء لعام، 1992، إلا أن المكشافات المكروية الأشرطة تزيد عليها في الدقة بنحو عشر مرات.

تطبيقات في فيزياء الجسيمات:

على الرغم من أن تطبيقات المكشافات المكروية الأشرطة ازدهرت بطرق لم يكن من الممكن في البداية تخيلها، فإنها وُلدت نتيجة حاجة علمية محددة هي: كشف ودراسة الجسيمات ذات «الفتنة»، أي الجسيمات التي تحتوي على كوارك الفتنة. فهذا الكوارك هو أحد المقدسات الستة في النموذج الفيزيائي المعياري المتطور الخاص بالمكونات الأساسية للمادة وتفاعلاتها. فالمادة في هذا النموذج، مبنية كلها من ستة كواركات (كوارك القمة والقاع والفتنة والكوارك الغريب والكواركان العلوي والسفلي)، جنباً إلى جنب مع ستة تعرف باللبتونات[4] والجسيمات المضادة الاثنتي عشرة المقابلة للكواركات واللبتونات.

ولجسيمات الفتنة فترات عمر تقدر بجزء من الترليون (بيكوثانية واحدة). وبعد تحررها من جراء أحد التصادمات العالية الطاقة، يتحرك جسيم الفتنة عادة بضعة مليمترات، وفقاً لطاقته ونوعه، قبل أن يتحلل إلى بضعة جسيمات أخرى. والنقطة التي يتولد عندها جسيم الفتنة ويتحرر تعرف بالذروة (الرأس) Vertex الأولية، أما النقطة التي يتفكك عندها فتدعى بالذروة الثانوية. ويشكل تمييز الذروة الثانوية من الذروة الرئيسية أحد المتطلبات الرئيسية لكشف جسيمات الفتنة وتحديد خصائصها.

ويتم اكتشاف هذه الذرا باقتفاء مسارات الجسيمات المنبعثة عن تصادم معين بمجموعة من المكشافات المرتبة بالقرب من الموضع الذي يحدث عنده التصادم. وفي تجربة الحزم المتصادمة تتألف هذه المجموعة عادة من عدة طبقات متحدة المركز من المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة، تقع خلفها بضع من حجرات الغاز ذات الأسلاك. ويتم استقراء المسارات المسجلة بفعل هذه المكشافات وتمديدها نحو منطقة الذروة الأولية، في حين تتقارب مسارات الجسيمات الناجمة عن تفكك جسيم الفتنة نحو ذروة ثانوية تكون، إذا سار كل شيء على ما يرام، مميزةً عن الذروة الأولية.

وكما سيتبين، من أجل الحفاظ على الذرا المختلفة في مواضعها المحددة، يجب أن تكون الدقة اللازمة لاستقراء المسارات أقل بكثير من فترة عمر الجسيم مضروبة بسرعة الضوء. والدقة المطلوبة في حالة جسيمات الفتنة هي بضع عشرات من الميكرونات، وهي قيمة تقع ضمن قدرات المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة.

وهنالك من قبيل المصادفة المحضة، نوعان آخران من الجسيمات التي لها فترات عمر تقارب تلك التي تملكها جسيمات الفتنة، (فللبتون تاو) Tau Lepton، وهو العضو المعروف الأثقل ضمن عائلة اللبتونات، فترة عمر تبلغ 0.3 بيكوثانية. ولجسيمات القاع، التي تحتوي على كوارك القاع، فترات عمر من رتبة 1.5 بيكوثانية. لذا، فإن المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة مناسبة تماماً لكشف ودراسة جسيمات كتلك.

جسيمات القاع ذات الدلالة:

ينطوي كشف جسيمات القاع على أهمية خاصة لفيزياء الطاقة العالية، وهو يشكل أحد الأهداف المركزية للعديد من أنظمة الكشف الحالية والمستقبلية المكروية الشريط. فمن جهة، يتوقع أن تسلك هذه الجسيمات بشكل مختلف عن مضاداتها المناظرة، لذا فإن دراستها لا بد أن تلقي الضوء على (الخلل) Imperfection المحيِّر في التماثل بين (المادة) Matter و(المادة المضادة) Antimatter. (يشير الفيزيائيون إلى هذا «بالانتهاك CP»). إضافة إلى ذلك، تتفكك الجسيمات التي تحتوي على كوارك القمة (جسيمات القمة). باستمرار إلى كواركات القاع. ويتوقع كذلك أن يتحلل جسيم هيكز في معظم الوقت، إذا لم تكن كتلته كبيرة جداً، إلى زوج من الجسيمات، أحدها جسيم القاع والآخر جسيم القاع المضاد. لهذا فإن ثلاثة من أكثر المساعي التجريبية في الفيزياء الحديثة إلحاحاً ترتبط ارتباطاً وثيقاً بجسيمات القاع، وترتبط بالتالي بالمكشافات المكروية الأشرطة.

وتتمثل إحدى الطرائق الفعالة لتوليد جسيمات القاع ودراستها في صدم حزم من الإلكترونات ذات الطاقة العالية بالإلكترونات المضادة (البوزترونات) صدماً مباشراً لتوليد جسيمات تدعى Z°، تتفكك بدورها إلى جسيمات قاع وجسيمات قاع مضادة (إن Z° هو أحد ثلاثة (بوزونات عيارية) Gauge Bosons تنقل القوة الضعيفة التي تتحكم في التفكك الإشعاعي، أما الاثنان الآخران فهما W^{+} و W^{-}). وثمة آلة من آلات التصادم الحزمي لهذا الغرض هي (مصادم الإلكترونات ـ البوزترونات الكبير) Large Electron Positron Collider (LEP)، الواقع في نفق طوله 27 كيلومتر يمتد على الحدود الفرنسية السويسرية قرب جنيف. والمصادم LEP جزء من مختبر المركز الأوروبي لفيزياء الجسيمات CERN. فهنالك أربع تجارب تجمع البيانات في المصادم LEP، بما فيها تجربة تدعى (آلف) Aleph، نعمل عليها مع 400 فيزيائي آخرين.

ففي مركز تجربة آلف يوجد مكشاف ذروة يتكون من ترتيب أسطواني من مكشافات السيليكون المكروية الأشرطة وثنائي الوجوه مركبة في طبقتين متحدتين في المركز موضوعتين حول أنبوب الحزمة الذي يحتوي على منطقة التصادم. وتحيط بمكشاف الذروة هذا مصفوفة كبيرة من مكشافات الجسيمات التي تحتوي على حجرتي اقتفاء غازيتين متضمَّنتين داخل مغنطيس (فائق الموصلية) Superconducting. ويُستخدم نظام الكشف المعقد هذا لتحديد

---

[4] اللبتونات هي أسرة رئيسية أخرى من الجسيمات الأولية وتأتي على ستة أنواع (نكهات): الإلكترون، والنيوترينو الإلكتروني، الميون، النيوترينو الميوني، التاو والنيوترينو التاوي. (المحرر)

الجسيمات التي تتطاير من منطقة التصادم، وقياس (اندفاعاتها) Momenta بمجرد تفكك الجسيم Z.

وفي نحو 70 في المئة من الزمن يتفكك الجسيم Z إلى بضع (اثنين في العادة) (همرات) Showers ضيقة أو «نفثات» من الجسيمات التي تتحرك خارج منطقة التصادم. ومن بين ما يقارب الخمس من هذه الأحداث ثمة نفثة تحتوي على جسيم القاع، وأخرى تحتوي على جسيم القاع المضاد. وكل جسيم قاع يتحرك في المتوسط بضعة مليمترات قبل أن يتفكك، وغالباً ما يكون ذلك التفكك إلى جسيم الفتنة وآخر أو أكثر من جسيمات أخرى.

ويستطيع (مكشاف ذروة آلف) Aleph's Vertex Detector بأدواته السيليكونية المكروية الأشرطة أن يُظهر مشهداً مضخّماً من الحدث بوضوح فائق. ومن بين ما يتم التركيز عليه الذروة الرئيسية حيث يتفكك الجسيم Z ويولد جسيم القاع، والذروة الثانوية حيث يتفكك إلى جسيم الفتنة. فضلاً عن ذلك، هنالك ذروة واضحة من الدرجة الثالثة.

إن هذا النوع من المعلومات المفصّلة، المجمعة من عدد كبير من الأحداث، يظهر بعض الخصائص الأساسية لجسيمات القاع. ففترات عمرها، التي تخبرنا عن التفاعلات الضعيفة لكوارك القاع، يتم قياسها من (طول التفكك) Decay Length — وهي المسافة بين الذروتين الرئيسية والثانوية— إضافة إلى ذلك، فإن هذا الطول نفسه يمثل عاملاً في قياسات التواتر (التردد) Frequency الذي يتحول به جسيم القاع المعتدل إلى الجسيم المضاد المقابل — وهذا مثال مدهش عن تحول المادة إلى المادة المضادة.

كوارك القمة والهيكز:

لقد أدت المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة دوراً مهماً في البحث الناجح عن كوارك القمة (أكبر الكواركات الستة كتلة) الذي طال استقصاؤه. وسيكون الدور مركزياً في محاولات البحث في المستقبل عن الجسيم المطلوب أكثر من غيره في فيزياء الطاقة العالية، ألا وهو بوزون هيكز. وفي مطلع الشهر 1995/3 جاء تعزيز لوجود كوارك القمة من مختبر (مسارع) Accelerator فيرمي القومي في إلينوي، حيث يعمل مصادم تيفاترون، الذي يعتبر الآن آلة الصدم الجسيمي الأعلى طاقة في العالم، على صدم بروتونات طاقتها 900 بليون إلكترون فلط بالبروتونات المضادة ذات الطاقة نفسها.

وفي جزء صغير جداً من التصادمات بين البروتونات ومضاداتها تتولد جسيمات تحتوي على كوارك القمة. وتتفكك جسيمات القمة جميعها تقريباً إلى جسيم القاع وإلى بوزون عياري مشحون (W^+ أو W^-). وقد استخدم مكشاف الذروة المصنوع من السيليكون لعزل الأحداث التي تحتوي على (تفككات قاعية) Bottom Decays، مما يؤدي إلى فصل أحداث القمة عن (أحداث الخلفية) Background Events وهذا بدوره يعزز إلى حد كبير إشارة القمة.

ومازال بوزون هيكز الأكثر تمنعاً على الكشف. فبعد أكثر من ثلاثة عقود من العمل النظري والتجريبي — المتواصل، يظل الكشف عن هذا البوزون هدف فيزياء الجسيمات الذي تسعى إليه جاهدة دون جدوى. ويُفترض أن بوزون هيكز يُضفي كتلة على الكواركات واللبتونات المشحونة وكذلك على الجسيم Z والبوزونات +W و W^- [انظر: «بوزون هيكز»، *مجلة العلوم ، العدد 8(1989)، ص90*].

لقد خرجت محاولات البحث عن بوزون هيكز في مختبر المصادم LEP من دون نتيجة، مما يشير إلى أنه ثقيل لدرجة لا يمكن معها توليده بمعدل قابل للكشف في المصادم LEP بطاقة التصادم التي يملكها في الوقت الحاضر، ولكن البحث سرعان ما سيُستأنف بنشاط متجدد عندما تتم مضاعفة طاقة المصادم LEP تقريباً، حيث سيستخدم الباحثون مكشافات ذروة محسّنة من السيليكون من أجل تحديد التفككات القاعية التي تعتبر مميزة لطريدتهم.

وفي النهاية قد يحتاج الأمر إلى آلة طاقة أكبر. والآلة التي ربما تكون الأكثر احتمالاً لكشف الهيكز، وحتى لكشف فيزياء جديدة تمتد إلى ما وراء (النموذج المعياري) Standard Model هي (مصادمات الهادرونات الكبير) Larg Hadron Collider (LHC) الذي سيبنيه المركز CERN. وهذا المصادم، بطاقته التي تقرب ثمانية أضعاف طاقة المصادم تيفاترون، سيعمل على صدم بروتونات ببروتونات داخل نفق المصادم LEP، وسيعمل كذلك على توسيع البحث عن بوزون هيكز إلى البحث عن كتل أثقل بعدة مرات من أي شيء قابل للكشف بوساطة الأدوات المنتشرة حالياً.

وحتى في آلات المصادم LHC ذات الطاقة العالية، ستكون بوزونات هيكز غير شائعة فعلاً. وسيعمل الباحثون على تعويض ذلك بضبط معدل التفاعلات ليكون معدلاً مرتفعاً فوق العادة — نحو بليون تفاعل في كل ثانية — إلا أن مثل هذا التواتر سيؤدي إلى ظروف تجريبية صعبة. فالأحداث المعنية النادرة جداً لابد أن يتم فصلها من بين كم هائل من الحطام، مما يزيد بصورة جائرة تعرُّض المكشافات والأجهزة الإلكترونية للإشعاعات.

وفي هذه الظروف الصعبة ستكون المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة إحدى التقانات الريادية. إذ ستمكن سرعتها العالية وصغر المسافة الفاصلة بين عناصر الكشف فيها الباحثين من الفصل بين الأحداث الناجمة عن تصادمات الحزم المختلفة وتمييز المسارات القليلة المهمة بينها. وستسمح دقتها العالية بقياس دقيق لاندفاعات الجسيمات المشحونة ذات الطاقة العالية وذلك من الانحناء البسيط في مساراتها في حقل مغنطيسي.

رؤية النجوم:

لقد بدأت الثورة في دقة الاقتفاء، التي تعززت بمكشافات سليكونية مكروية الأشرطة، في التدفق نحو حقول أخرى من البحث، وبشكل خاص الفيزياء الفلكية والتصوير بالأشعة السينية. وثمة إمكانية مثيرة تكمن في الدراسات الفلكية بوساطة أشعة غاما انطلاقاً من ساتل (قمر صنعي). فهنالك مجموعات من جامعة ستانفورد ومعاهد أخرى تعمل على تصميم نظري لمقراب (تلسكوب) لأشعة غاما، ذي سطح كبير من السيليكون، بوسعه مسح مصادر أشعة غاما من مجرتنا ومن خارجها بدقة وحساسية لا سابق لهما.

وسيتم في هذا المقراب تشبيك مكشافات سليكونية مكروية الأشرطة بألواح معدنية رقيقة يمكنها، على وجه العموم، أن تحوّل شعاع غاما العالي الطاقة الساقط إلى زوج: إلكترون ــ بوزترون. ويتم اقتفاء هذا الزوج في طبقات مكشاف مكروي الشريط، معطياً بذلك معلومات عن اتجاه شعاع غاما الساقط.

وعلى الرغم من كون المكشاف المكروي الشريط مفيداً بهذا القدر، فإنه غير كامل. فالمكشاف ذو الوجهين والمزود بمجموعات من أشرطة الكشف المتعامدة المستقلة، لا يستطيع بنفسه أن يحدد أكثر من ضربة واحدة في آن واحد. فالجسيم المنفرد يولد إشارة واحدة على كل من الوجهين ــ ويمكن الربط بين هاتين الإشارتين من دون لبس لتعطيا موضعاً ذا بعدين. أما الجسيمات المتعددة فتولد إشارات متعددة، مسببة لبساً ما ــ فالإشارة على أحد الوجهين يمكن أن ترتبط بواحدة من عدة إشارات على الوجه الآخر.

وثمة تطبيقات كثيرة، كالتصوير بالأشعة السينية، تتطلب موضعاً لا لبس فيه لكل ضربة بما في ذلك الضربات المتزامنة. واستحداث ما يسمى مكشافات العنصورة (عنصر صورة، بيكسل) Pixel بمقدرة كهذه يمثل حقلاً ناشطاً جداً. ثمة نوع قيد التطوير في المركز CERN وفي أمكنة أخرى هو مكشاف العنصورة المهجّن. ففي هذا الجهاز تصنع شبية المكشاف بالطريقة نفسها تقريباً التي يصنع بها مكشاف الشريط باستثناء الاستعاضة عن الأشرطة بتشكيل في بعدين من المربعات أو المستطيلات الصغيرة (العنصورات)، وهي عادة ما بين 50 و500 ميكرون على كل وجه. وهذه الشبية تلتصق بشبية أخرى تحمل تشكيلاً مناظراً من المضخمات/ عناصر لمعالجة الإشارة، بحيث توصل كل عنصورة بأحد تلك العناصر بوساطة مجموعة من النتوءات الموصلة.

ويخطط لاستخدام المكشافات العنصورية في الطبقات الأقرب إلى الداخل من أنظمة اقتفاء الجسيمات المشحونة في تجارب مصادم الهادرونات الكبير LHC. وقرب منطقة التصادم ذات الكثافة الجسيمية العالية يمكن تحقيق أفضل تمييز وإعادة تشكيل المسار بوساطة الحبيبة الناعمة، أي قياسات نقاط الفضاء الممكنة بفضل الأجهزة العنصورية.

وثمة استخدام آخر ممكن للمكشافات العنصورية مازال في مرحلة مبكرة من التطور يتمثل في (التصوير الإشعاعي) Radiography بالأشعة السينية، وذلك لغايات التصوير الطبي وبخاصة تصوير الثدي. فالأشعة السينية التي تمتص في مكشاف عنصوري تولّد مباشرة إشارات يمكن تحويلها إلى صور في شكل إلكتروني رقمي للعرض والتحليل والتخزين الحاسوبي المباشر، وبذلك يتم التخلص من عوامل التأخير التي تصاحب الأفلام الفوتوغرافية.

التكافل (التعايش) في الميدان:

تعتبر المكشافات السيليكونية المكروية الأشرطة مثالاً جيداً لعملية مشاركة لا تُقدَّر حق قدرها. فغالباً ما يحفز الدافع العلمي لسبر غور الطبيعة على تطوير تقانة جديدة وأدوات جديدة، ويقود في بعض الأحيان إلى خلق صناعات غير مألوفة البتة. ومثل هذه الأدوات المبتكرة تقود فيما بعد إلى تقدم أكبر في العلوم.

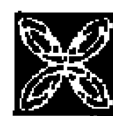
وعلى سبيل المثال، كانت الرغبة في فهم الذرة قد قادت في العشرينيات إلى ظهور ميكانيك الكم. وهذا بدوره قاد إلى فهم أعمق للمادة في الحالة الصلبة، وإلى اختراع الترانزستور في عام 1947. وقد رسخ الترانزستور ثورات الإلكترونيات والحاسوب التي مازالت تكشف أشياء جديدة. فتطورها كان حجر الزاوية في صناعة أشباه الموصلات التي تستخدم تقانتها الآن لتصنيع المكشافات المكروية الأشرطة. وتساعد هذه الأجهزة على الإجابة عن أكثر الأسئلة إلحاحاً في الفيزياء الأساسية: طبيعة كوارك القمة وبوزون هيكز، إذا اكتفينا بإعطاء مثالين فقط.

فالعلم والتقانة مترابطان بشكل لا ينفصم في نسيج جميل جداً. والكلّ أعظم بكثير من مجموع الأجزاء.

المؤلفان

Alan M. Litke – Andreas S. Schwarz

اشتركا في أواسط الثمانينيات في بناء أولى المنظومات التي تعتمد أشرطة السيليكون المكروية لأغراض الكشف عن الجسيمات ذات الطاقة العالية في تجارب الحزم المتصادمة. وقد نُفذ البرنامج في مركز المسارع الخطي في ستانفورد. يعمل ليتكه باحثاً فيزيائياً في معهد سانتا كروز لفيزياء الجسيمات وأستاذاً غير متفرغ في جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز. ويعمل حالياً على تجربة آلف Aleph في المركز الأوروبي لفيزياء الجسيمات CERN، بالقرب من جنيف. أما شفارتز فهو علمي رئيسي في مختبر فيزياء الجسيمات الألماني في هامبرغ ــ ديزي DESY. ويشارك حالياً في تجربة ستقوم بدراسة الفرق الدقيق بين سلوك المادة والمادة المضادة



مسرعات الجسيمات تختبر النظرية الكونية

هل يوجد حد لعدد عائلات الجسيمات الأولية؟ إن البقية الباقية من الانفجار الأعظم البدئي، الذي انبثق منه الكون، توحي بذلك. وقد أشرفت المسرعات على بلوغ الطاقات اللازمة لتأكيد هذا الحد.

(د. ن. شرام). (ك. ستايكمان)

العائلة الأولى | العائلة الثانية | العائلة الثالثة | العائلة الرابعة (؟) | العائلة الخامسة (؟) | العائلة السادسة (؟)

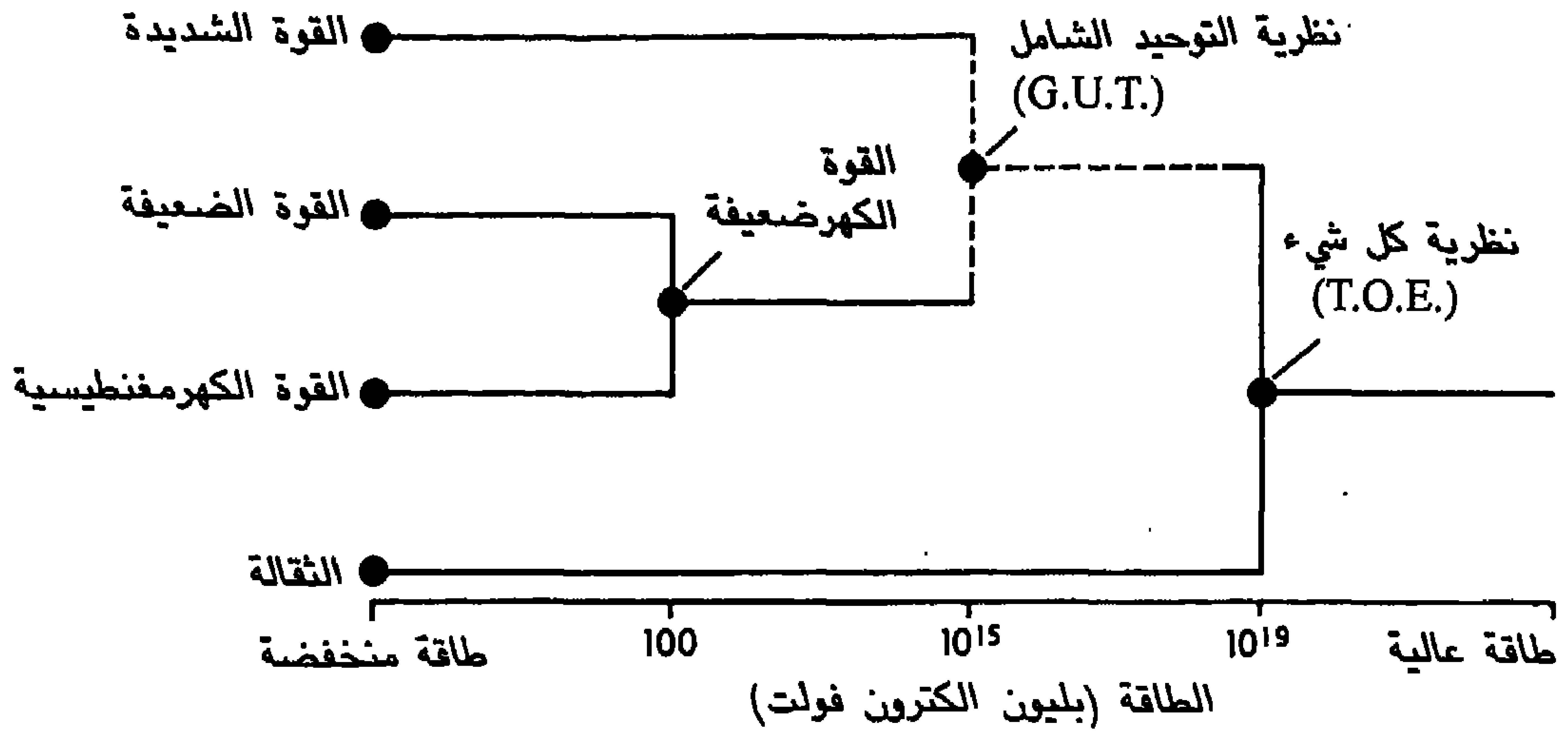
+1
كواركات
+⅔
+⅓
لبتونات حيادية (نتريونوهات)
ν_e ν_μ ν_τ
0
كواركات
−⅓
−⅔
لبتونات مشحونة
e^- μ^- τ^-
−1

تتجمع المكونات الأساسية للمادة، المدعوة كواركات ولبتونات، في عائلات تتألف من نوعين لكل صنف من الجسيمات، يمكن للجسيمات أن تتمايز بشحنتها الكهربائية، من ضمن خواص أخرى. يوجد اليوم ثلاث عائلات مصنوعة من 12 كواركاً ولبتوناً معروفة. تتألف المادة العادية كلها من أعضاء من العائلة الأولى. (يتألف البروتون مثلاً من كواركين فوقيين وكوارك واحد تحتي). ولا تقدم النظريات المستمدة من فيزياء الجسيمات سوى نبوءات قليلة عن عدد العائلات المرتقبة. ومن حيث المبدأ يمكن أن يكون هذا العدد لا نهائياً. لكن النظريات المستمدة من علم الكون توحي بوجود عدد لا يزيد عن أربع عائلات كحد أقصى. ويجري الآن اختبار هذه النبوءة في عدة مسرعات للجسيمات.

لقد حدث في العقد الأخير من السنين تزاوج بين فرعين من فروع العلم، علم الكون وعلم فيزياء الجسيمات الأولية، في رابطة تآزرية تولد منها عدد من النتائج المثيرة. وقد بدأت هذه النتائج إعطاء صورة عن خلق الزمكان[1] والمادة في آونة سحيقة تقع بين 10^{-43} و10^{-35} ثانية بعد انبثاق العالم الكوني من الانفجار البدئي المعروف باسم «الانفجار الأعظم» big bang ، بل إن هناك دلائل مهمة عن طبيعة الانفجار الأعظم نفسه يمكن أن تنتج من نظرية يجري تطويرها واشتهرت باسم «نظرية كل شيء» (T.O E) theory of everything النهائية. إن من شأن هذه النظرية أن تصف في عملية كاملة جريئة كل التفاعلات التي تحدث بين الجسيمات.

إن التقاء علم الكون وفيزياء الجسيمات يقود حتى إلى حرف العلم عن الطريق الذي كان يسلكه. فلم يكن علم الفلك في كنهه علماً تجريبياً، بل بالأحرى علماً رصدياً يقتصر على تسجيل المشاهدات السلبية بوساطة المقاريب (التلسكوبات)، لكنه كاد أن يكون خلواً من العمل التجريبي المقارن . أما الوسائل

[1] كلمة تم تركيبها بالقصر والجمع من كلمتي الزمان والمكان.



يمكن تفسير كل التفاعلات التي تحدث بين الجسيمات الأولية بوساطة أربع قوى أساسية في الطبيعة. القوة الشديدة تربط بين الكواركات، والقوة الضعيفة مسؤولة عن تفككات نووية معينة، والقوة الكهرمغنطيسية تربط بين الشحنات الكهربائية، وأخيراً القوة التثاقلية تربط بين الكتل. ويعتقد أن القوى الأربع كانت ذات يوم تؤلف قوة واحدة عند الطاقات العليا التي سادت هذا الكون إبان الانفجار الأعظم. وقد أمكن بالفعل الحصول على نظرية موثوقة تجريبياً توحد القوة الضعيفة والقوة الكهرمغنطيسية. ويطلق اسم نظرية التوحيد الشامل (G.U.T) على النظرية التي ستوحد هاتين القوتين مع القوة الشديدة. أما ما يدعى نظرية كل شيء (T.O.E) فهي النظرية التي ستوحد القوى الأربع كلها في قوة وحيدة.

التقليدية لفيزياء الجسيمات فكانت المسرعات ذات الطاقة العالية.

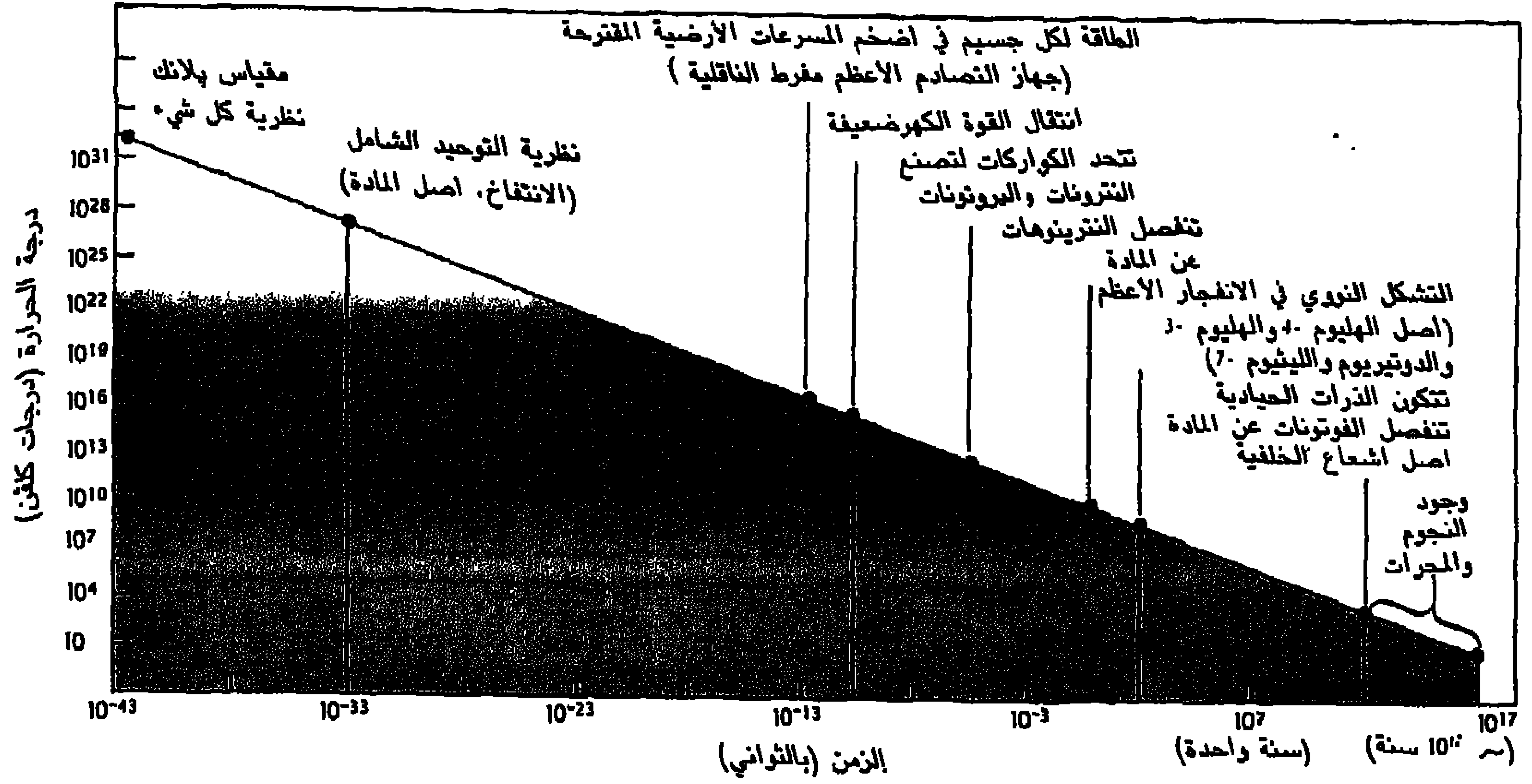
وقد بدأ اليوم علم الكون الجديد بتقديم نبوءات عن فيزياء الجسيمات الأولية، وأصبح التفكير ممكناً بأن يتاح اختبار النبوءات الكونية في «تجارب مقارنة» controlled experiments دقيقة تستخدم المسرعات. وقد اقتضى الوصول إلى مرحلة التجارب الملائمة عشر سنوات من العمل على تحسين المسرعات أداءً وطاقة، لكن التجارب ما تزال تتقدم الآن. وقد شهدت النتائج الأولية على صحة نبوءات علم الكون.

ومن ذلك يتضح أن علم الكون أصبح علماً حقيقياً، بمعنى أن الأفكار لم تعد تقتصر على التفو بل أصبحت أيضاً تختبر في المختبرات بمقاييس زمنية أقصر من فترة حياة العالم الواحد. وقد قطع هذا العلم مسافة طويلة بعد العصور المبكرة التي شهدت تكاثر النظريات الكونية التي لم تكن تملك إلا القليل من وسائل تأكيد أي منها أو نقضه، إلا جاذبيتها الجمالية. وفي مقابل ذلك يمكن اليوم استخدام المقراب عند الحاجة لاختبار الأفكار الآتية من الفيزياء الأساسية كالأفكار المطروحة في (T.O.E) والواقع أن اختبارات النظريات التي تتناول التفاعلات بين الجسيمات الهائلة الطاقة لا يمكن أن تتم بشكل جيد إلا في مختبر ملائم وحيد: الانفجار الأعظم نفسه.

إن الوليد الأول الذي خرج من تزاوج علم الكون وفيزياء الجسيمات هو أكثر الأولاد نجابة. فلو كان عدد الأنواع الأساسية المختلفة من الجسيمات الأولية كبيراً جداً لما كان الكون على ما هو عليه. أي، بتعبير آخر، يوحي علم الكون إلى أن عدد الجسيمات الأولية لابد أن يكون صغيراً. وهذه النبوءة بعينها تخرج من تحليل التفاعلات النووية التي حدثت في أثناء الثانية الزمنية الأولى تقريباً من عمر الكون. والخطوة الجريئة التي نخطوها في هذا السبيل هي تحويل المقادير الكونية (كالكثافة الطاقية الوسطية) إلى مقادير ذات أهمية في فيزياء الجسيمات (كعدد الجسيمات الأساسية).

إن نبوءتنا هذه ما تزال ذات قيمة معنوية، لكنها كانت ذات فعالية عظيمة عندما طرحت لأول مرة. ذلك لأن الفكرة السائدة آنذاك كانت تقول بأن جسيمات جديدة ستظهر من جراء ازدياد طاقة المسرعات. ولم يكن في النظريات الآتية من فيزياء الجسيمات سبب وجيه يضع حداً لعدد أنواع الجسيمات الأساسية التي يمكن أن توجد، بل كان الظاهر أن هذا العدد لا نهاية له. أما الآن فإن النبوءة النظرية الآتية من اعتبارات كونية تناقض ذلك الاستنتاج التجريبي. وبمرور الزمن تبين أن هذه النبوءة ظلت متينة بل واشتد عودها. فعدد الجسيمات الأساسية لا بد أن يكون محدوداً، وإلا كان العالم الكوني مختلفاً عما هو عليه.

ولكي نشرح كيف تضع الاعتبارات الكونية حدوداً لعدد أنواع الجسيمات الأولية لا بد أولاً من إلقاء نظرة قصيرة على فيزياء الجسيمات. ففي النصف الماضي من هذا القرن تبين من التجارب التي تستخدم مسرعات الجسيمات أن الجسيمات الأساسية يمكن أن تجمل في صنفين كبيرين: الفرميونات والبوزونات (تخليداً لاسمي العالميـن : الإيطالي ـ الأمريكي (إ. فرمي) E.Fermi والهنـدي



إن التاريخ الحراري للكون، وهو الذي بدأ بعد 10^{-43} ثانية من الانفجار الأعظم واستمر حتى اليوم، يشير إلى أن معظم نوى الهيليوم -4 والهيليوم -3 والدوتيريوم (الهدروجين الثقيل) والليثيوم -7 الموجودة في هذا الكون قد تشكلت بعد دقيقة واحدة تقريباً من الانفجار الأعظم. أما العناصر الأثقل فقد تشكلت في بطون النجوم في فترات بين عشرات الملايين وبلايين السنين من عمر الكون.

(س. ن. بوز S.N. Bose). والفرميونات هي الجسيمات التي تتشكل منها المادة، أما البوزونات فهي حاملة القوى بين الجسيمات. وتنقسم الفرميونات بدورها إلى زمرتين : الكواركات واللبتونات. إن كلمة «كوارك» quark جاءت من جملة غريبة وردت في رواية (ج. جويس James Joyce) بعنوان Finnegans Wake تقول: «ثلاثة كواركات للسيد مارك!»، أما كلمة «لبتون» lepton فمشتقة من كلمة leptos اليونانية التي تعني جسيماً صغيراً. إن الكواركات هي مكونات النترونات والبروتونات والجسيمات المتصلة بها المسماة «هدرونات» hadrons. أما اللبتونات فتستطيع، إذا كانت مشحونة كالإلكترون، أن تدور حول النوى الذرية لتشكل الذرات، أما إذا كانت غير مشحونة، مثل اللبتونات التي تسمى نترينوهات، فتستطيع أن تخترق الأرض من أقصاها إلى أقصاها دون أن تتفاعل مع أي شيء. هذا ولكل جسيم جسيم مضاد له الكتلة نفسها والأجل الحياتي نفسه، لكنه ذو خواص كهربائية متضادة.

إن التفاعلات التي تحدث بين شتى الجسيمات تحكمها أربع قوى أساسية، كل قوة منها محمولة على بوزون منفصل أو على مجموعة بوزونات. فالفوتون، أو «كم» quantum الضوء، يحمل القوة الكهرمغنطيسية بين الشحنات الكهربائية، و«الكرافيتون» graviton يحمل القوة التثاقلية بين الكتل، والقوة النووية الشديدة بين الكواركات محمولة على ثمانية «كليونات» gluons، في حين أن القوة النووية الضعيفة، المسؤولة عن بعض التفككات النووية، محمولة على بوزونات وسيطة متجهة. ويبدو، في الوقت الحاضر، أن كل التفاعلات التي تحدث في هذا الكون يمكن اختزالها في اتحادات من هذه التفاعلات الأربعة.

إن السمة الأكثر إثارة، على طريق تطور فيزياء القرن العشرين، كانت البرهان على أن توحيد هذه القوى يبدأ عند الطاقات العليا، أو درجات الحرارة العليا. وبصورة خاصة، أثبتت التجارب التي تمت في «سيرن» CERN (المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات، في جنيف) أن القوتين، الضعيفة والكهرمغنطيسية، تجتمعان في قوة واحدة كهرضعيفة عندما تتجاوز طاقة التفاعل القيمة GeV 100 (GeV 1 =10^9 إلكترون فولط) . وهذه الطاقة تتوافق مع درجة حرارة الكون بعد حوالي 10^{-10} ثانية من الانفجار الأعظم، أو أربعة تريليونات مرة تقريباً مثل درجة حرارة الغرفة. وبعد هذا الاكتشاف تعزز الأمل في إمكانية أن تنضم القوة الشديدة إلى القوة الكهرضعيفة عند طاقة قيمتها 10^{15} GeV تقريباً وذلك في إطار «نظرية توحيد شامل» grand unified theory (G.U.T) ، ومن ثم تنضم، عند حوالي 10^{19} GeV، قوة الثقالة لتؤلف كلها معاً قوة واحدة وحيدة في إطار ما أسميناه (T.O.E).

إن الطاقات اللازمة لاختبار الأفكار المطروحة في (G.U.T) (نظرية التوحيد الشامل) وفي (T.O.E) هائلة إذا قيست بالطاقات التي توفرها المسرعات الجسيمية العاملة حالياً. فأضخم هذه المسرعات في العالم وهو الـ«تيفاترون» Tevatron في مختبر فيرمي القومي للمسرعات والذي يبلغ محيط حلقة التسريع فيه أربعة كيلومترات، لا يوفر أكثر من GeV 2000. ولو أردنا صنع

مسرع يعمل وفق مبدأ عمل هذا التيفاترون ويوفر طاقة تجعله قادراً على اختبار أفكار G.U.T لوجب أن تمتد دائرة حلقته حتى تصل إلى أقرب نجم إلينا، ولو أردنا منه أن يختبر أفكار T.O.E لوصلت دائرة حلقته إلى مركز مجرتنا. ولا ريب أن أصغر هاتين الآلتين يقع خارج آمال أعظم المتفائلين في الحصول على المال لبنائه. وهذا الواقع البسيط كان أهم الأسباب التي دعت إلى محاولة استخدام الأرصاد الكونية لاختبار نبوءات فيزياء الجسيمات.

لقد بدأ سيل التحريات هو الأخر يسلك هذا الطريق الجديد: إن مسرعات فيزياء الجسيمات تستخدم اليوم لاختبار نبوءة يقدمها علم الكون. إن النبوءة الكونية التي تهمنا الآن تتعلق بوضع حدود لعدد الجسيمات الأساسية في المادة.

يبدو أن هناك 12 جسيماً أساسياً بالإضافة إلى جسيماتها المضادة المقابلة. إن ستة من الجسيمات الأساسية هي كواركات، وتحمل أسماء ارتجالية هي: «فوقي» up و«تحتي» down و«مفتون» charm و«غريب» strange و«علوي» top (أو«حقيقي» truth) و«سفلي» bottom (أو«جميل» beauty). وقد تم اكتشاف كل هذه الكواركات باستثناء العلوي، ورغم وجود أدلة نظرية متينة على وجوده فإنه ما يزال يفتقر إلى الإثبات التجريبي. أما الجسيمات الأساسية الستة الأخرى فهي اللبتونات التالية: الإلكترون و«الميون» muon والجسيم «تاو» tau ونترينوهات ثلاثة شريكة لها هي: النترينو الإلكتروني والنترينو الميوني والنترينو التاوي.

إن هذه الجسيمات الاثني عشر تؤلف ثلاث عائلات، وكل عائلة تضم أربعة أعضاء. تتألف العائلة الأولى من الكوارك الفوقي والكوارك التحتي، والإلكترون والنترينو الإلكتروني، وتتألف الثانية من الكوارك المفتون والكوارك الغريب والميون والنترينو الميوني، وتتألف الثالثة من الكوارك العلوي والكوارك السفلي والتاو والنترينو التاوي. إن كل المادة العادية مصنوعة من أعضاء من العائلة الأولى. فالبروتون مثلاً يتألف من كواركين فوقيين يحمل كل منهما شحنة تساوي 2/3 وحدة الشحنات الكهربائية الموجبة ومن كوارك تحتي واحد يحمل شحنة تساوي 1/3 وحدة الشحنات الكهربائية السالبة. ويتألف النترون من كواركين تحتيين وكوارك فوقي واحد. وتتألف كل ذرة من قلب متماسك يضم بروتونات ونترونات مرصوصة معاً وتحيط به غمامة إلكترونية.

لما كانت كل المادة العادية مصنوعة من أعضاء من العائلة الأولى فإن أحد الأسرار العظيمة في فيزياء الجسيمات هو سبب وجود العائلات الأخرى، وكم عددها يا ترى؟ وهنا نردد مع (إ. إ. رابي) I.I.Rabi الراحل قوله حين اكتشاف الميون: «من أمر بذلك؟». ونظراً لشيوع اكتشاف المزيد من الجسيمات لدى ازدياد طاقة المسرعات يمكن للمرء أن يتوقع استمرار ظهور العديد من العائلات. الواقع أن مقترحات G.U.T لا تقول سوى القليل عن عدد العائلات الكلي. فالنموذج الأول مثلا لـــ G.U.T الذي اكتسب شعبية امتدت من منتصف السبعينيات حتى أواخرها والمرموز لــه بـــ SU(5) (للدلالة على مجموعة توحيد خاصة ذات خمس درجات حرية)، يمكن أن يضم أي عدد من العائلات.

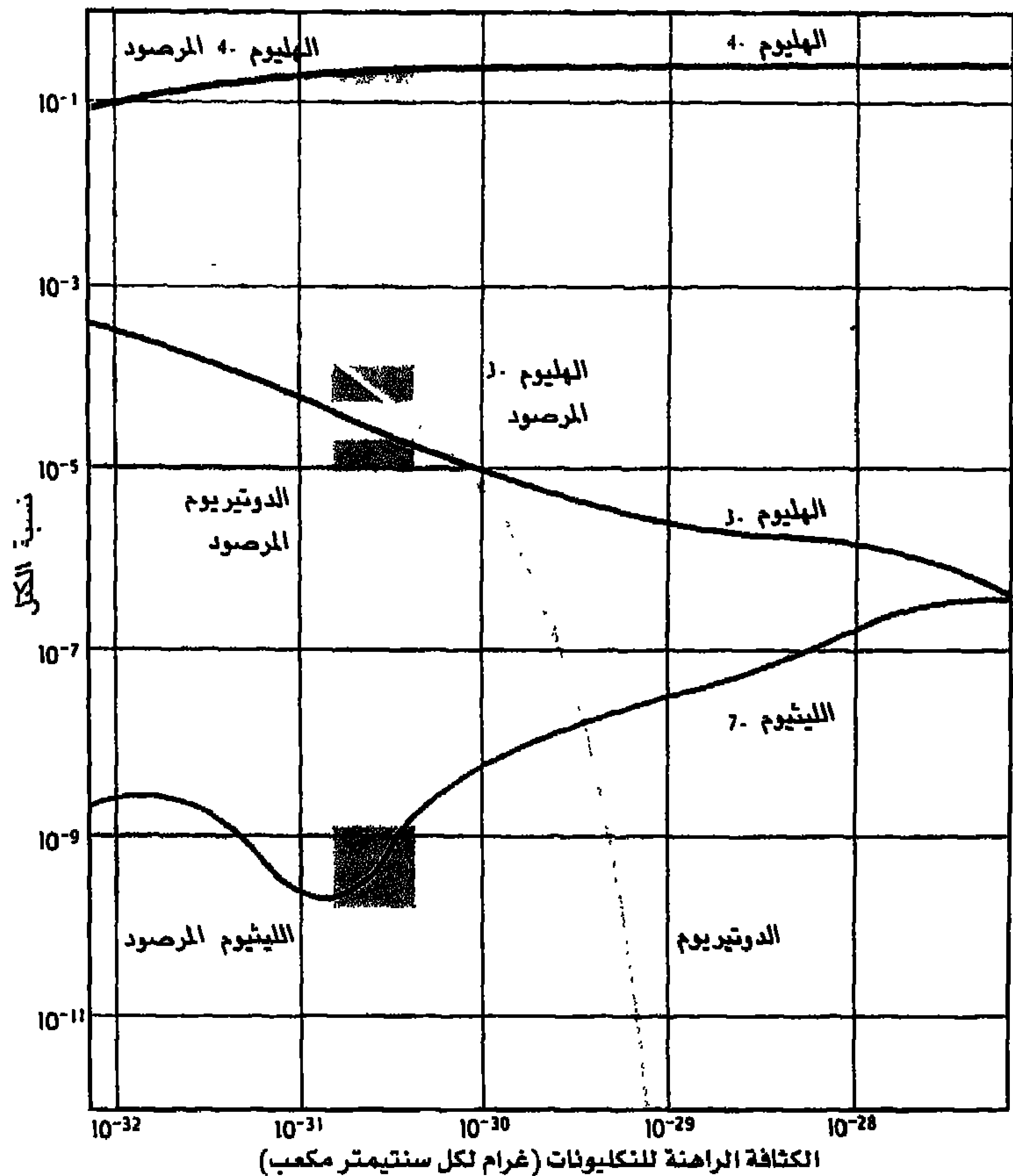
وعلى كل حال هناك سبب وجيه لوجود ثلاث عائلات على الأقل. فقد بين (م. كوباياشي) M.Kobayashi من العاملين في مسرع البروتونات الياباني، و«ت. ماساكاوا» T.Masakawa، من جامعة طوكيو، أن اللاتناظر بين المادة والمادة المضادة الذي اكتشفه عام 1964 كل من (ف. ل. فيتش) Val.L.Fitch من جامعة برنستون و(ج. و. كرونين) James. W. Cronin من جامعة شيكاغو، يُفهم بشكل أفضل إذا كان يوجد ثلاث عائلات على الأقل من الجسيمات الأساسية. فهذا اللاتناظر يمكن أن يفسر الزيادة الملحوظة للمادة عن المادة المضادة في هذا الكون، ويتيح بالتالي وجود المادة *(انظر: «صدع في مرآة كونية» مجلة العلوم، 5 (4)، 1988)*.

ومع ذلك يود المرء لو يعلم بالضبط عدد عائلات الكواركات واللبتونات. فإذا كانت الكواركات واللبتونات هي اللبنات الأساسية في بناء الطبيعة فإن المرء يجب أن يطلع على جميع المكونات. ولو تبين أن عدد العائلات غير محدود لحق لنا أن نتساءل عما إذا كانت الكواركات واللبتونات أساسية حقاً. فكما تتألف الذرات من بروتونات ونترونات وإلكترونات قد تكون الكواركات واللبتونات مصنوعة من جسيمات أصغر منها *(انظر: «The Structure of Quarks & Leptons» by Haim Harari, Scientific American April, 1983)*.

يتضح الآن أن الإجابة عن مسألة عدد عائلات الكواركات واللبتونات يمكن أن تأتي من علم الكون. وهذا العلم يوحي بوجود عدد محدود من العائلات ويقصر فوق ذلك العدد الممكن لهذه العائلات في حدود قيم صغيرة: ثلاث عائلات فقط أو أربع على الأكثر.

إن التنبؤ بمحدودية عدد العائلات يستند إلى شواهد مجمعة من رصد البقايا الباقية من أضخم تجربة تمت في أعظم المسرعات: تجربة الانفجار الأعظم. إن نموذج الانفجار الأعظم الكوني كان في البدء واحداً من نظريتين متنافستين في علم الكون سادتا المناقشات التي جرت خلال الخمسينيات وأوائل الستينيات. كانت النظرية الأخرى تدعى نظرية «حالة الاستقرار». وقد ظهرت كلتا النظريتين لتفسير ما اكتشفه (إ. ب. هبل) Edwin P. Hubble عام 1929 من أن العالم الكوني في حالة توسع. ووفقاً لنموذج الانفجار الأعظم فإن الكون كان ذات يوم ساخناً جداً وذا كثافة وبعد توسعه برد وقلت كثافته. أما نظرية حالة الاستقرار فتقول بأن ثمة مادة تخلق على الدوام وتحتفظ للكون في أثناء توسعه بكثافة ثابتة.

وفي خلال الستينيات اكتسب نموذج الانفجار الأعظم شواهد رصدية عززت مكانته إلى أن ربح الجولة في السبعينيات. وكـــان أشهر هذه الشواهد الاكتشاف الذي استحق جائزة نوبل على



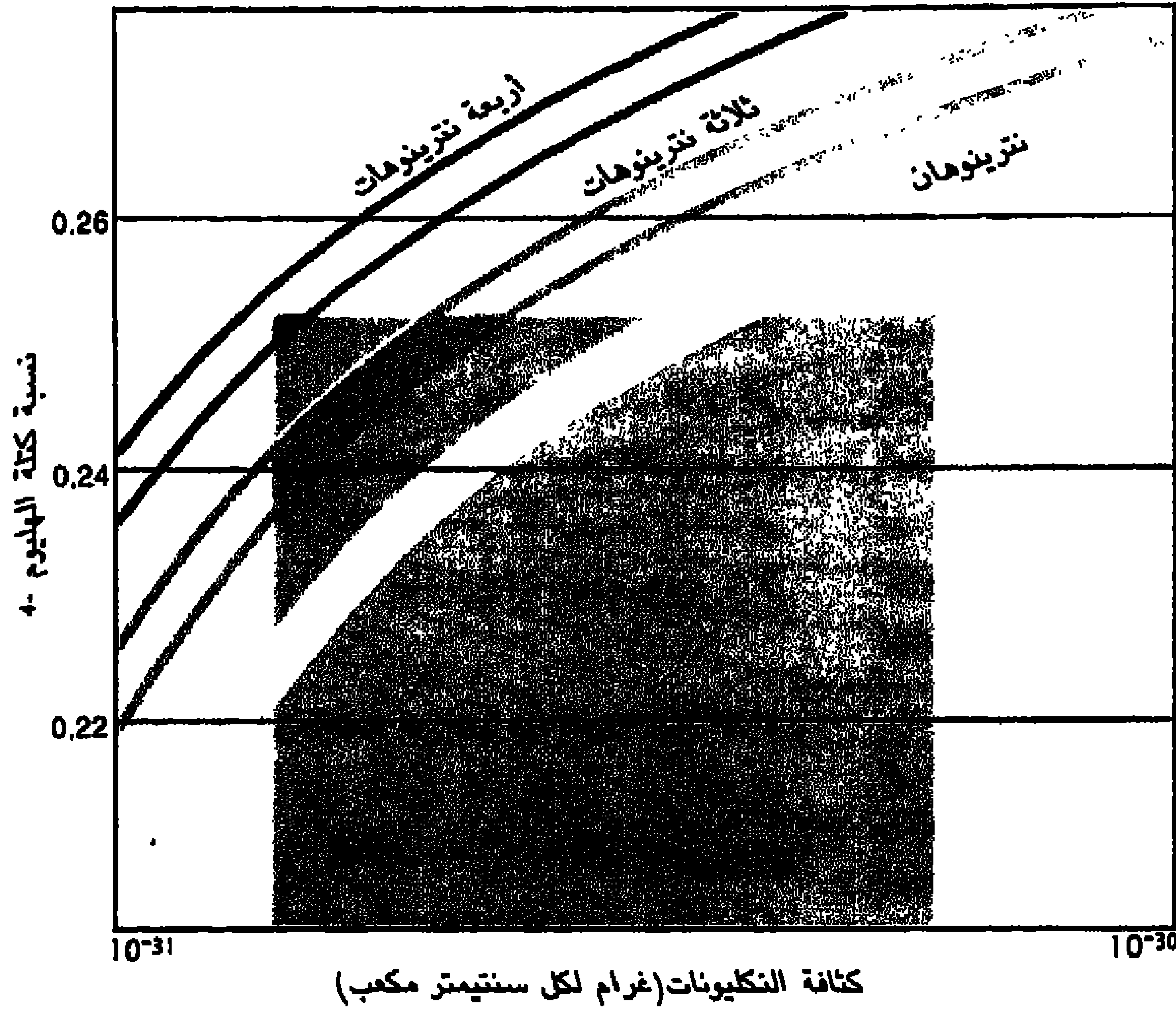
إن الوفرات المتوقعة للهليوم -4 والهيليوم -3 والدوتيريوم والليثيوم -7 في نظرية الانفجار الأعظم (المنحنيات)، تتفق جيداً مع الوفرات المرصودة (العصابات الأفقية الداكنة). وتختلف الوفرات المتوقعة تبعاً لكثافة النكليونات (البروتونات والنترونات) في أثناء الانفجار الأعظم. تشير العصابات العمودية (الشاقولية) الداكنة إلى أفضل تقدير كوني حالياً لهذه الكثافة. والاتفاق الشديد هو من أقوى الحجج على صحة نموذج الانفجار الأعظم.

يدي (أ. أ. بنزياس) Arno A. Penzias و(ر. و. ويلسون) Robort W.Wilson من مختبرات شركة Bell للهواتف. فنموذج الانفجار الأعظم ينطوي بالضرورة على أن العالم الكوني كان ذات يوم كثيفاً وحاراً لدرجة أن مادته كانت ولابد قد أصدرت إشعاعاً حرارياً ذا طيف مميز لها. أما نظرية حالة الاستقرار فتنطوي، من جهتها، على أن كثافة الكون كانت دوماً على ما هي عليه اليوم. وعلى ذلك فإن هذا الكون لم يكن إذن قط في حالة كثيفة وحارة، فهو بالتالي خلو من الإشعاع الحراري. لكن بنزياس وويلسون اكتشفا خلفية إشعاعية لموجة مكروية تتفق مع فكرة الحرارة والكثافة العاليتين المتوقعة في نموذج الانفجار الأعظم.

لكن أقوى دعم لنموذج الانفجار الأعظم جاء من دراسات ظهور التشكيلات النووية البدائية: أي تشكل العناصر. فدرجة الحرارة القريبة من 100 مليون مرة تقريباً مثل درجة حرارة الغرفة ضرورية لكي تتشكل من البروتونات والنترونات عدة عناصر كيميائية، ومثل هذه الدرجات الحرارية يمكن أن تكون قد حصلت بعد الانفجار الأعظم بحوالي ثانية واحدة. وبمقدور المرء أن يسبر، بقياس الوفرة النسبية للعناصر، غور الظروف الماضية حتى يصل إلى الثانية الأولى بعد خلق هذا الكون. وبالمقارنة، فإن الخلفية الإشعاعية للموجة المكروية تفيد كسابر لظروف الكون الماضية عندما كان عمره حوالي مئة ألف سنة، أيام كانت الفوتونات تعاني أواخر انتثاراتها عن المادة عند درجة حرارة قريبة من 3000 درجة كلفن (درجات سيلزية فوق الصفر المطلق)، أي أكبر عشر مرات تقريباً من درجة حرارة الغرفة.

سندخل بعد قليل في تفاصيل تشكل النوى الذرية إبان الانفجار الأعظم، لأن هذه التفاصيل لا تساعد فقط في توطيد فكرة الانفجار الأعظم بل تقود أيضاً إلى الصلة مع فيزياء الجسيمات. لكن من الأجدر أن نذكر أولاً أن نظرية تشكل تلك النوى في ذلك الانفجار تتنبأ بوفرات لعدة عناصر خفيفة ونظائرها، بما فيها الهيليوم -4 والهيليوم -3 والدوتيريوم (الهدروجين الثقيل) والليثيوم -7. والوفرات المتوقعة تغطي تقريباً عشرة مقادير من الكبر. وتشهد الأرصاد القياسية على صدق هذه التنبوءات بتفاصيلها الكمية.

إن الاتفاق المدهش بين تنبوءات نظرية تشكل النوى في الانفجار الأعظم وبين نتائج القياسات الفلكية لوفرات العناصر الخفيفة يشكل دعماً إضافياً على صحة هذه النظرية. وهناك أيضاً،



توحي وفرة الهيليوم -4 بوجود أربع عائلات للجسيمات الأولية على الأكثر. تمثل المنحنيات الثلاثة صورة مكبرة لجزء المنحني المتعلق بالهيليوم والواقع ضمن العصابة العمودية (الشاقولية) الداكنة المرسومة في الصفحة 94. إن المنحني الضيق في ذلك الرسم ينفصل إلى ثلاثة منحنيات عريضة. يبين المنحني السفلي نبوءة وفرة الهيليوم -4 المتوقعة من وجود عائلتين من الجسيمات الأولية، ويشير المنحني الأوسط إلى الوفرة المتوقعة من وجود ثلاث عائلات، ويشير المنحني العلوي إلى الوفرة المتوقعة من وجود أربع عائلات. إن وفرتي الهيليوم -4 المتوقعتين من وجود عائلتين وثلاث عائلات من الجسيمات تقعان إلى حد بعيد ضمن المنطقة التي تعينها عمليات رصد الهيليوم -4 وتقديرات الكثافة النكليونية (المنطقة الخضراء). أما وجود عائلة رابعة فيقود إلى وفرة قريبة جداً من الطرفين البعيدين المقبولين. ويظهر بوضوح عدم وجود مكان لأكثر من أربع عائلات.

بين النظرية والرصد، اتفاق في قيمة كثافة البروتونات والنترونات ينسجم تماماً مع الكثافة المحسوبة من دراسة ديناميات المادة المنيرة في هذا الكون. هذا وإن التوقعات المستمدة من تطور الكون خلال ألف الثانية الأولى بعد الانفجار الأعظم تتفق مع الأرصاد التي جرت بعد عشرة بلايين سنة.

يبدو أن الفيزيائيين يملكون اليوم فهماً كمياً لتطور الكون منذ تشكل النوى إبان الانفجار الأعظم حتى يومنا هذا. وهذا الفهم التفصيلي يعزز الثقة اللازمة لمحاولة التوغل إلى أعماق ماضي هذا الكون حتى نصل إلى الظروف التي تلائم (G.U.T) و(T.O.E).

إن نظرية تشكل النوى في الانفجار الأعظم تستمد قوتها من واقع أن المقادير الأساسية المطلوب إدخالها في المعادلات التي تفسر هذا التشكل معروفة بدرجة جيدة من تجارب مختبرية سابقة. ونذكر خصوصاً أن درجات الحرارة، التي يعتقد أن تشكل النوى حصل فيها أثناء الانفجار الأعظم، تتوافق مع الطاقات التي يمكن تحريها بسهولة بوساطة مسرعات ضعيفة الطاقة، كالمسرع الخطي المعروف باسم «فان دو كراف» Van de Graaff. وعلى هذا فإن سلوك النوى الذرية، في أثناء تشكلها في ظروف الانفجار الأعظم، معروف بدقة، لا من قبيل التكهنات.

ولحساب ما يحدث لا نحتاج إلا لاتباع تطور غاز من النترونات والبروتونات في كون آخذ بالتوسع والتبرد. ولما كانت البروتونات والنترونات يشار إليها جميعاً بالـ «نكليونات» nucleons فإن الفيزيائيين يسمون هذا الغاز «الغاز النكليوني». وعند درجات حرارة أعلى بكثير من 10 بلايين درجة كلفن، وهي التي كانت سائدة قبل مضي الثانية الأولى من الانفجار الأعظم بكثير، كانت البروتونات والنترونات متواجدة في حالة توازن بأعداد متساوية. إن درجات الحرارة هذه كانت أشد من أن تتيح للبروتونات والنترونات أن تندمج معاً لتشكل نوى أكثر تعقيداً. لكن اصطدامها بالإلكترونات والبوزترونات (الإلكترونات المضادة) وبالنترينوهات والنترينوهات المضادة حول النترونات إلى بروتونات والبروتونات إلى نترونات بمعدلين متساويين تقريباً. ولما كان النترون أثقل بقليل من البروتون فإن تحول النترونات إلى بروتونات أسهل من التحول المعاكس. بيد أن هذا الفرق في الكتل مهمل الشأن على كل حال عند الطاقات العالية جداً.

لكن هذا الفرق في الكتل أصبح أكبر شأناً لدى انخفاض درجة حرارة الكون إلى 10 بلايين درجة كلفن، وعندئذ هبطت نسبة النترونات إلى البروتونات من الواحد إلى أقل من الثلث. وعندما بلغت درجة حرارة الكون بليون درجة كلفن هبطت هذه النسبة إلى ما دون السُّبع بقليل. وعندئذ أصبحت البرودة كافية لكي تبدأ البرتونات والنترونات بالاندماج لتشكل أبسط نواة مركبة: الدوتيريوم، التي تتألف من بروتون ونترون فقط. ولدى تفاعل الدوتيريوم مع البروتونات أو النترونات الأخرى يتشكل التريتيوم (بروتون ونترونان) والهيليوم -3 (بروتونان ونترون). وتفاعل هاتين النواتين شكل الهيليوم -4، ولما كان الهيليوم -4 أشد تماسكاً بكثير من أية نواة خفيفة أخرى فإن سيل التفاعلات هذا قد حول تقريباً كل النترونات، التي كانت ما تزال موجودة عند درجة حرارة بليون درجة كلفن، إلى هليوم -4. وقد

تشكلت أيضاً كمية صغيرة من البريليوم -7 (أربعة بروتونات وثلاثة نترونات) والليثيوم -7 (ثلاثة بروتونات وأربعة نترونات) عندما تفاعل الهيليوم -4 مع الهيليوم -3 ومع التريتيوم على هذا الترتيب. وبمختصر القول، يعتقد أن تشكل النوى في الانفجار الأعظم قد ولد الهيليوم -4 من آثار زهيدة من الدوتيريوم والهيليوم -3 والليثيوم -7.

وهكذا يتوقف السيل عند الهيليوم -4 لعدم استقرار النوى التي تنتج من تفاعل نواة الهيليوم -4 مع البروتون أو مع النترون أو مع نواة هليوم -4 أخرى. أما غالبية العناصر الأخرى فقد تشكلت في أحشاء النجوم التي بلغت كثافتها قيمة تتيح لثلاث نوى هليوم -4 أن تتحد لتصنع الكربون -12.

إن وفرات العناصر الخفيفة التي تتنبأ بها نظرية تشكل النوى في الانفجار الأعظم تتفق تماماً، كما ذكرنا، مع الوفرات المرصودة. وبموجب هذه النظرية بدأت المادة تلتئم عندما أصبح عدد النترونات يساوي سُبْعَ عدد البروتونات. ولما كانت نوى الهيليوم -4 (التي تحوي عددين متساويين من البروتونات والنترونات) قد استهلكت كل النترونات عملياً فإن وفرة الهيليوم -4 يجب أن تفسر بالتقريب ربع كتلة المادة الكلية في هذا الكون. وبالفعل، تدل القياسات الرصدية على أن وفرة الهيليوم في المجرات، بما فيها مجرتنا، تقع بين 20% و 30%. أما النبوءة بوفرات الدوتيريوم والهيليوم -3 والليثيوم -7 المتوقعة، التي تقع بين أقل من جزء واحد من 1000 جزء إلى جزء واحد من 10 بلايين جزء، فتتفق أيضاً مع الوفرات المرصودة.

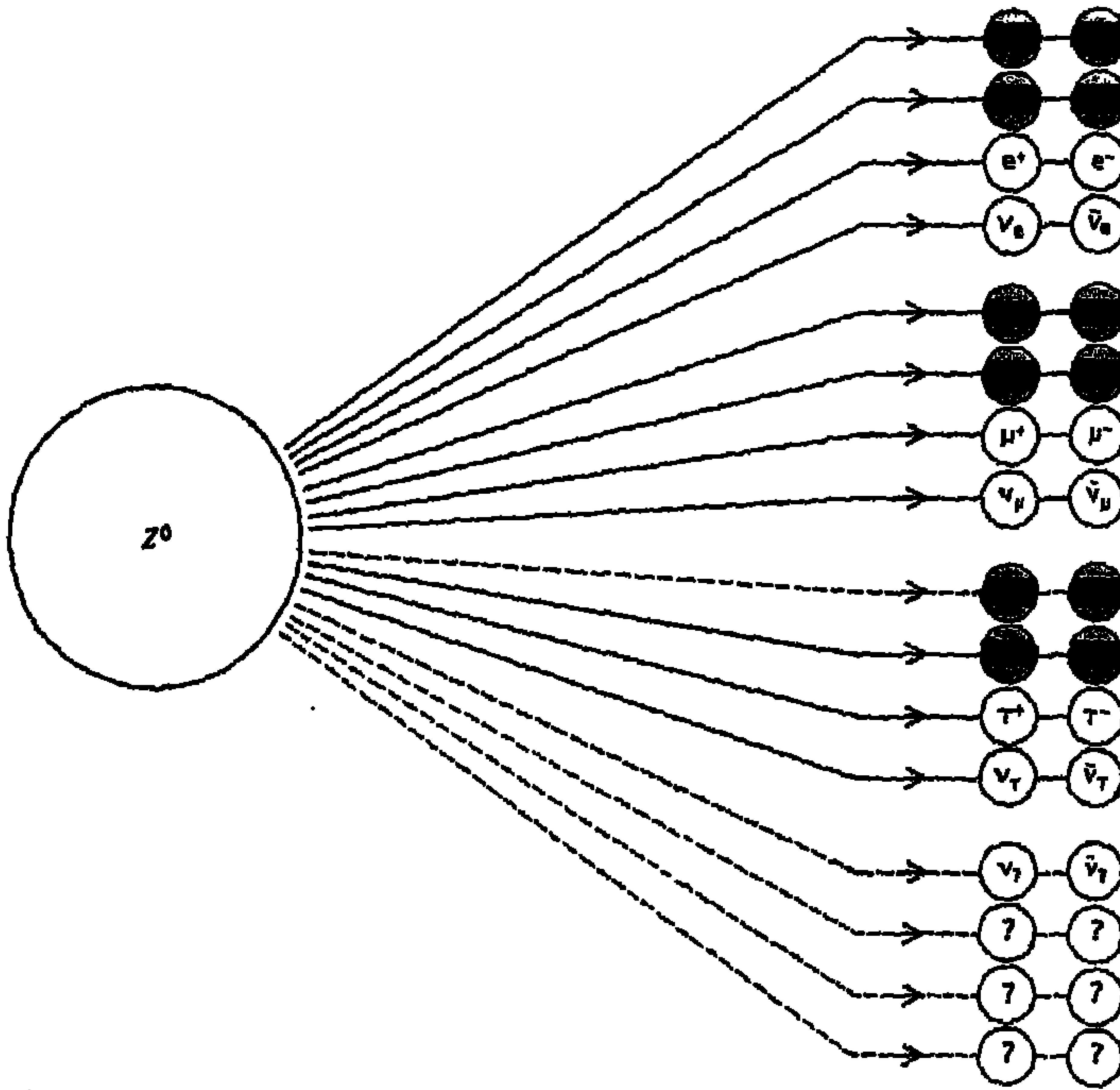
والآن، كيف تضع نظرية تشكل النوى في الانفجار الأعظم حدوداً للعدد المقبول من عائلات الجسيمات الأولية؟ الإجابة، بكل بساطة، هي أنه إذا تجاوز العدد 3 أو 4 فإن ذلك يجعل وفرة الهيليوم -4 المتوقعة تفوق وفرته المرصودة.

ومرد هذا القول يمكن أن يعزى إلى أن الوفرات المتوقعة للعناصر الخفيفة تتوقف على متغيرين: كثافة النكليونات وكثافة الإشعاع في الكون. ولئن كانت قيمة أي من هذين المتغيرين ليست معروفة بالضبط لسوء الحظ، إلا أن تغير كل من هاتين القيمتين ضمن نطاق صغير يولد وفرات محسوبة متفقة مع الوفرات المرصودة. وعند التعويض عن قيم الوفرات المرصودة في المعادلة المناسبة، نستطيع حساب كم يجب أن تكون كثافة النكليونات والإشعاع. ومعرفة هاتين القيمتين تقود إلى عدد من الاستنتاجات المهمة.

إن كثافة الغاز النكليوني تزداد متناسبة مع مكعب درجة الحرارة. وهذا يعني أن الكون، عندما كان أسخن بمرتين مما هو عليه اليوم، كان ذا كثافة نكليونية أكبر بثماني مرات. وبحساب الكثافة النكليونية اللازمة لتشكل نوى الدوتيريوم والهيليوم -3 والليثيوم -7 في الانفجار الأعظم نستطيع حساب الكثافة النكليونية الراهنة. إنها تقع بين $2x10^{-13}$ و$5x10^{-30}$ غراماً لكل سنتيمتر مكعب. إن مثل هذا النطاق يتفق مع كثافة المادة المنيرة التي استنتجت من دراسة ديناميات المجرات والعناقيد المجرية، لكنه أخفض بعشر مرات على الأقل من الكثافة التقديرية للكتلة التثاقلية المطلوبة لانغلاق الكون أو لتوقف توسع الانفجار الأعظم. ذلك أن انغلاق الكون يتطلب مادة إضافية غير نكليونية. والبحث عن هذه المادة، المظلمة حكماً، أي التي لا ترى في المقاريب والمصنوعة من شيء غير النكليونات، قائم على قدم وساق. (*انظر: «Dark Matter in the Universe,» by Lawrence M.Krauss, Scientific American, December, 1986*).

يمكن أن نقدم تفسيراً لكثافة الإشعاع على أسس مماثلة تقود، هي الأخرى، إلى القيود التي تحدد عدد عائلات الجسيمات الأولية. والكثافة الإشعاعية مهمة لتشكل النوى في الانفجار الأعظم لأنها كانت آنئذ تتحكم في معدل توسع الكون. ذلك أنها تتناسب في كل آن مع عدد أنواع الإشعاع، أو قل مع عدد أنواع الجسيمات المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء. وقد كان يوجد، على ما يعتقد، في أثناء تشكل النوى إبان الانفجار الأعظم، تسعة أنواع من هذه الجسيمات «النسبوية» relativistic: الفوتون (طبعاً) والإلكترون والبوزترون والنترينو الإلكتروني والنترينو الميوني والنترينو التاوي والنترينوهات الثلاثة المضادة لها. والنترينوهات جسيمات إما أن تكون عديمة الكتلة أو تكون كتلتها صغيرة لدرجة أنها تتحرك بسرعة الضوء تقريباً، ولكل من الإلكترون والبوزترون كتلة صغيرة تتيح لهما، في ظروف الطاقات العالية التي كانت قائمة في زمن تشكل النوى البدئي، أن تتحرك هي الأخرى بما يقارب سرعة الضوء. هذا وإن كثافة الإشعاع الصادر عن هذه الأنواع التسعة من الجسيمات توفر الظروف اللازمة حكماً لانتاج وفرة الهيليوم -4 المرصودة. (من الجدير بالذكر أن كثافة الهيليوم -4 مستقلة عملياً عن الكثافة النكليونية، وهذه حقيقة كان «ف. هويل» Fred Hoyle وزميله «ر. تيلور» Roger Taylor أول من لحظها في الستينيات، ثم أمكن التحقق منها بشكل أدق لدى عدد من الباحثين).

لقد اقتصرنا، في حساب وفرة الهيليوم -4، على الفوتونات والإلكترونات والبوزترونات والنترينوهات الثلاثة المعروفة وأضدادها. ولئن كان يعرف وجود عائلات أخرى من الجسيمات الأساسية فإن ذلك يستدعي إدخال تعديل على الحساب، إلا أن هذا التعديل لا يكون محسوساً إلا من أجل أعضاء هذه العائلات من النترينوهات، ذلك أن النترينوهات وحدها، من كل عائلة بعد العائلة الأولى ، قادرة، بسبب خفتها، على الحركة بما يضاهي سرعة الضوء. وأغلب الظن أن كل عائلة جديدة بعد الثالثة لن تسهم بأكثر من نترينو واحد والنترينو المضاد المقابل. ،



إن اختبار عدد العائلات يجري اليوم في العديد من مسرعات الجسيمات المنتشرة في العالم. إن الجسيم المدعو البوزون Z^0 يمكن أن يتفكك إلى كواركات ولبتونات. ويشترك كل جسيم مع جسيمه المضاد. (إن للجسيم المضاد كتلة تساوي بالضبط كتلة جسيمه العادي وشحنة كهربائية متضادة. ويوضع، للدلالة على الجسيم المضاد، خط صغير فوق رمز الجسيم العادي). والتفككات المسموح بها ممثلة بخطوط مستمرة. وكلما كثر عدد العائلات ازداد تفكك البوزون Z^0 ونقصت فترة حياته. فقياسات فترة حياته تشكل إذاً مؤشراً على عدد عائلات الجسيمات. والتقديرات الحالية تقول إن هذا العدد يساوي خمساً على الأكثر. ومن المتوقع أن تقود التجارب المستقبلية إلى نتائج أكثر دقة.

لو كان الغاز الذي صنع منه العالم الكوني محتوياً نترينوهات إضافية لكانت كثافة إشعاعه أكبر. وهذا كان سيستدعي أن يكون التوسع الكوني، إبان تشكل النوى في الانفجار الأعظم، أسرع مما هو عليه. فالواقع أن نسبة النترونات إلى البروتونات حساسة جداً، إزاء معدل توسع الكون. وسبب ذلك أن مزيداً من معدل التوسع يقصِّر الوقت المتاح للنترونات كي تتحول إلى بروتونات، وذلك يؤدي إلى وجود فائض من النترونات، وهذا يعني أن نسبة النترونات إلى البروتونات كانت ستكون أكبر، ولما كانت النترونات تستهلك سريعاً في أثناء تشكل الهيليوم فإن وفرة هذا العنصر كانت هي بالتالي ستكون أكبر.

إن نوى الهيليوم -4 هي الأكثر وفرة أثناء تشكل النوى في الانفجار الأعظم وهو، بالتالي، العنصر الذي يستطيع الراصدون قياسه بأكبر دقة. لكن بما أن الهيليوم -4 يتشكل أيضاً في النجوم فمن المهم أن نقدر، في الهيليوم المرصود في الأجرام السماوية، الجزء البدائي ــ الذي جاء من الانفجار الأعظم ــ والجزء الذي تولد في النجوم بعد ذلك الانفجار. لقد تعاونت، في هذا الشأن، مع (ج. س. كالنكر) John S.Gallangher، من مرصد «لويل»، فوجدنا أن كمية الهيليوم الإضافية من النجوم يمكن اقتفاء أثرها بقياس الكربون الذي تحويه هذه الأجرام، فالنجوم التي تصنع الهيليوم تصنع الكربون أيضاً، مما يجعل وفرة الهيليوم تزداد بازدياد وفرة الكربون. وهذا يتيح للمرء أن «يطرح» إسهام النجوم في وفرة الهيليوم -4 من الوفرة المرصودة كي يستنبط وفرة الهيليوم البدائي.

وقد توصلنا إلى أن أكبر قيمة مقبولة لوفرة الهيليوم -4 البدائي أقل بقليل من 25%.

لقد بينت حساباتنا أن مثل هذه الوفرة الضعيفة لا يمكن أن تأتي من الانفجار الأعظم إلا إذا لم يكن يوجد أكثر من نوع واحد من النترينو والنترينو المضاد المقابل. ولو كان قد وجد نترينوهات أكثر من ذلك لكانت كثافة الإشعاع عظيمة لدرجة تجعل وفرة الهيليوم -4 المتشكل أثناء الانفجار الأعظم أكبر من الوفرة المرصودة. وهذا يعني أن العدد الكلي لعائلات الجسيمات الأولية يساوي ثلاثاً، أو أربعاً على الأكثر. وهكذا توحي أعمالنا هذه بأن كل العائلات الأساسية للجسيمات الأولية ربما يكون اكتشافها قد أنجز. وقد أدلينا بهذه الحجة الأساسية منذ أكثر من عشر سنوات بالتعاون مع (ج. إ. كون) James E. Gunn من جامعة برنستون، وقد تحسنت، لاحقاً وبشكل محسوس، قياسات وفرة الهيليوم -4 وتقدير نسبة البدائي فيها. وقد زاد في أهمية هذه الحجة وفي توقيتها أن المسرعات بدأت اليوم تضطلع باختبارها.

إن البحث عن أنواع جديدة من النترينوهات كان دائماً عملية شاقة ومضنية. فقد كانت الوسائل التقليدية تقتصر في استكشاف النترينو على الترصد، أولاً، لشريكه: اللبتون المشحون. ومحذور هذه الطريقة هو أنها، رغم ضآلة كتلة النترينو أو حتى انعدام كتلته، يستلزم توليد اللبتون الشريك، كمية عظيمة من الطاقة، وكلما كانت كتلة هذا اللبتون أثقل كانت طاقة المسرع اللازم لتوليده أكبر. فالجسم تاو مثلاً كتلة كبيرة لدرجة أن (م. ل. بيرل) Martin L.Perl وزملاءه من «مركز مسرع ستانفورد الخطي» Stanford Linear

Accelerator Center (SLAC) احتاجوا إلى طاقة بلغت عدة بلايين إلكترون فولط، وتتوافق مع درجة حرارة تزيد عن 10^{13} درجة كلفن، كي يقتنصوه. وفي مثل هذه الطريقة يمكن للمرء أن يستنتج أن التوب الذي يليه يتطلب طاقة تفوق حدود المسرعات الحالية.

أما الطريقة الجديدة في البحث عن النترينوهات فقد انبثقت من تجارب «سيرن» المذكورة سابقاً والتي بينت أن القوتين، الضعيفة والكهرمغنطيسية، هما بالفعل مظهران لقوة واحدة كهرضعيفة. ففي عام 1983 نجح فريق من باحثي«سيرن» قوامه مئات من الفيزيائيين يقودهم (ك. روبيا) Carlo Rubia، في تنفيذ ما كانوا يريدون، وهو إثبات وجود البوزونات الوسيطة المتجهة، حاملة القوة النووية الضعيفة المتكهن بها. وقد اتضح وجود ثلاثة منها يرمز لها اليوم بالبوزونات W^+ وW^- وZ^0.

لقد كان اكتشاف البوزون Z^0 خصوصاً، داعماً لعملنا. فهو جسيم حيادي كهربائياً: مما يعني أنه يستطيع أن يتفكك إلى أزواج من النترينوهات والنترينوهات المضادة لأنها، هي أيضاً، حيادية كهربائياً. (إن البوزون Z^0 يستطيع أيضاً أن يتفكك إلى أزواج مشحونة من الجسيمات والجسيمات المضادة مثل الإلكترون والبوزترون. وبتعبير آخر، فإنه البوزون Z^0 جعل من الممكن إنتاج كل نوع من أنواع النترينوهات مباشرة، أي دون إنتاج التوب الشريك أولاً. إن فترة حياة البوزون Z^0 تفيد كقياس لعدد عائلات الجسيمات الأولية، لأن مزيداً من عدد العائلات يعني مزيداً من الخيارات الممنوحة للجسيم الذي يتفكك. ومن ثم فإن ازدياد عدد العائلات لا بد أن يعني تناقص فترة حياة البوزون Z^0 . فقياس فترة حياة هذا الجسيم بدقة يمكن أن تُظهر عدد عائلات الجسيمات الأولية.

إن قياس خصائص تفكك البوزون Z^0 يقتضي في البداية امتلاك آلة ذات طاقة تكفي لإنتاجه. لكن المسرعات القديمة، التي توفر حزماً من البروتونات أو الإلكترونات العالية الطاقة تصدم هدفاً ساكناً، تصرف جل طاقتها على الحركة، فلا تدع لإنتاج الجسيمات سوى طاقة صغيرة نسبياً. لكن الطريقة المستحدثة في آلة سيرن، والمعتمدة على فكرة اقترحها (س. ف. درمير) Simon van der Meer، تقتضي استغلال التصادم الجبهي بين البروتونات والبروتونات المضادة، مما يجعل القسط الأعظم من الطاقة يذهب لإنتاج الجسيمات الجديدة.

يوجد، في مواقع شتى من الكرة الأرضية اليوم، مسرعات تستغل التصادمات الجبهية. ففي تيفاترون مختبر فيرمي تُستخدم البروتونات ومضاداتها، وفي SLAC وأيضاً في «سنكروترون الإلكترونات الألماني» Deutsches Elektronen Synchroton (DESY) تصطدم الإلكترونات مع مضاداتها (البوزترونات). ورغم أن طاقة هذين المسرعين الأخيرين لا تكفي لإنتاج البوزونات Z^0 إلا أن ظواهر ميكانيكية كمومية تبيح لهما أن ينتجا أحياناً جسيمات «تقديرية» تقلد آثار البوزون Z^0.

إن النتائج الأولية التي وفرتها هذه الآلات تشير إلى وجود خمس عائلات من الجسيمات الأولية على الأكثر. ومن تضافر جهود (د. ب. كلاين) David B. Cline من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس، وجامعة وسكنسن في ماديسون، وأحد قادة «سيرن» تبين أن فترة حياة البوزون Z^0 تساوي تقريباً ما هو متوقع من وجود ثلاث عائلات فقط. على أن هناك ارتيابات تجريبية تبيح نوعين إضافيين من النترينو، وبالتالي عائلتين إضافيتين. لكن (ث. ل. لافين) Theodore L.Lavine، وهو طالب دراسات عليا في وسكنسن، جمع نتائج SLAC وDESY وحصل على حد قابل للمقارنة لعدد النترينوهات الكلي يساوي خمسة تقريباً. وكانت تلك المرة الأولى التي تستخدم فيها المسرعات لعد أنواع النترينوهات والحصول على عدد صغير، وتلك نتيجة كانت النظريات الكونية قد تنبأت بها، لا نظرية الجسيمات.

لكن الخطوة التالية تعد بأن تكون أكثر إثارة. فمع إنجاز المسرعات الجديدة وبدء توفيرها لمعطيات أكثر تقل فيها الارتيابات، سيتم اختبار الحد، 3 أو4 عائلات على الأكثر، الذي تتنبأ به النظرية الكونية وذلك بدقة بالغة. فقد تم تعديل آلة SLAC لإنتاج أعداد وفيرة من Z^0. واسم هذا المسرع الجديد هو «جهاز ستانفورد للتصادم الخطي» Stanford Linear Collider (SLC) ويجري في «سيرن» بناء مسرع آخر اسمه «الجهاز الكبير لتصادم الإلكترون ـــ البوزترون» Large Electron – Positron (LEP) Collider سينتج أعداداً وفيرة من البوزونات Z^0. إن هاتين الآلتين ستسبران غور الكون في طفولته بفعالية لا يمكن أن يبلغها أي مقراب أبداً.

المؤلفان

د.ن. شرام ــ ك. ستايكمان

كانا رائدين في تطوير حلقة الوصل بين علم الكون (الكسمولوجيا) وفيزياء الجسيمات. لقد حصل شرام، وهو أستاذ كرسي Louis Block للعلوم الفيزيائية في جامعة شيكاغو، على البكالوريوس عام 1967 من معهد ماساتشوستس للتقانة، وحصل عام 1971 على الدكتوراه من معهد كاليفورنيا للتقانة. يحب الرياضة، وتسلق عدة جبال في جميع أنحاء العالم وكتب عن تجاربه هذه في عدة

مجلات تعنى بالرياضة الخلوية. أما ستايكمان فهـو أسـتاذ الفيزيـاء والفلك بجامعة ولاية أوهايو. حصل على البكالوريوس في الفيزياء من كلية المدينة بجامعة نيويورك عام 1961 وعلى الدكتوراه من جامعة نيويورك عام 1968 ويقوم في أوقات فراغه بنزهات طويلة سيراً على الأقدام والتزلج والغطس والرقص.

مراجع للاستزادة

COSMOLOGICAL LIMITS TO THE NUMBER OF MASSIVE LEPTONS, Gary Steigman, David N. Schramm and James E. Gunn in *Physics Letters*, Vol. 66B, No, 2, Pghes 202-204p January 17, 1997.

THE EARLY UNIVERSE AND HIGH-ENERGY PHYSICS, David N. Schramm in *Physics Today*, Vol. 36, No. 4, Pages 27-33; April, 1983.

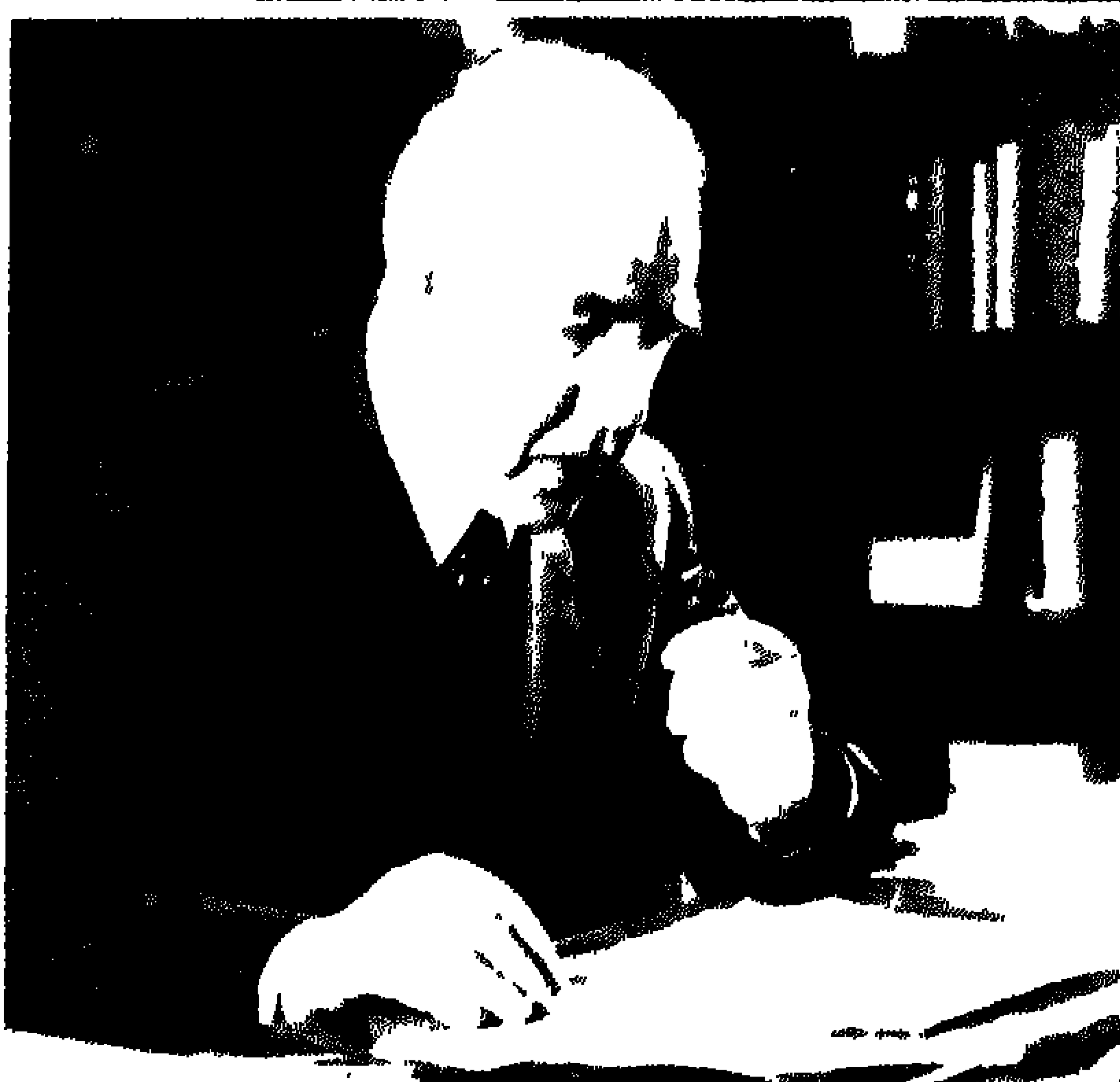
BIG BANG NUCLEOSYNTHESIS: THEORIES AND OBSERVATIONS. Gary Steigman and Ann Merchant Boesgaard in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 23, Pages 319-378; 1985.

NEUTRINO FAMILIES: THE EARLY UNIVERSE MEETS ELEMENTARY PARTICLE/ACCELER-ATOR PHYSICS. David B. Cline, David N. Schramm and Gary Steigman in *Comments on Nuclear and Particle Science*, Vol. 17, No, 3, Pages 145-161; 1987.



7 الباب السابع

سيرة ذاتية





بول ديراك وجمال الفيزياء

كان ديراك يفضل النظريات الجميلة على تلك المدعمة بالحقائق ولكنها غير أنيقة، فالحقائق ـ كما قال ـ تتغير باستمرار. ولقد أثبت المقولة هذه من خلال تنبؤه بوجود مادة مضادة.

(ر.س.هوفيس) ـ (هــ.كراف)

جرت العادة أن يطلب إلى الفيزيائيين المميزين، حين يزورون جامعة موسكو، أن يكتبوا على لوح أسود توصية للأجيال القادمة. وفي إحدى هذه المناسبات كتب (نيلز بور) جملة تختصر مبدأه القائل (بالتتامية) Complementarity والذي ينص على «أن المتعارضات ليست متناقضات، بل متتامات». أما (هيديكي يوكاوا) رائد نظرية التفاعلات النووية الشديدة، فقد كتب:«إن الطبيعة بسيطة في جوهرها». أما (بول ديراك) فقد اختار أن يكتب:«يجب على كل قانون فيزيائي أن يتمتع بجمال رياضياتي».

في عام 1963، كتب ديراك في هذه المجلة: «إن الإله رياضياتي من الدرجة الأولى، وقد استخدم رياضيات متقدمة جداً في بناء هذا الكون» [انظر:

«The Evolution of the Physicit's Picture of Nature», Scientific American, May 1963].

وبوحي من أفكار (آينشتاين) و(هرمان فايل) أصبح ديراك يهتم، أكثر من أي فيزيائي آخر، «بالجمال الرياضياتي» كسمة أساسية من سمات الطبيعة وكدليل يستهدي به في أبحاثه: «إن النظرية ذات الجمال الرياضياتي أقرب إلى الصحة من نظرية غير أنيقة ولو كانت هذه تنسجم مع بعض النتائج التجريبية».

إن هذا الإلحاح من قبل ديراك على الجمال والمنطق في الفيزياء الرياضياتية، إضافة إلى تحفظه الأسطوري وانطوائه على نفسه، قد جعلت منه إنساناً غامضاً بين علماء القرن العشرين الكبار. لكن عقلانيته المفرطة قادته، بعد بداياته اللامعة جداً في سني عمله الأولى، إلى مأزق عصيّة. فقد اكتشف حينما كان، بين الـــ23 والـــ31 من عمره، صياغة مبتكرة وفعالة لميكانيك الكم، وهو نظرية كمومية في إصدار الإشعاع وامتصاصه من قبل الذرات (نسخة أولية ولكنها مهمة، من الإلكتروديناميك الكمومي)؛ كما اكتشف المعادلة الموجية النسبوية للإلكترون وفكرة الجسيمات المضادة ونظرية وحيدات القطب المغنطيسي. ومع ذلك فإن القليل من أبحاثه اللاحقة كان ذا قيمة دائمة ولم يكن لأي منها الصفة الثورية التي كانت لاكتشافاته الأولى.



كان، كما كتب عنه الفيزيائي والبيولوجي الألماني (والتر إلساسر) «طويلاً ونحيلاً وقليل الرشاقة والكلام. لقد نجح في تكريس كل مواهبه لمهمة واحدة مسيطرة. كان رجلاً واسع الأفق في مجال عمله، ولكنه كان قليل الاهتمام والمعرفة بالنشاطات البشرية الأخرى. وبتعبير آخر، كان مثالاً للفكر الرياضياتي العالي. وفي حين كان يجتمع لدى سواه كثير من الاهتمامات، كان كل شيء لدى ديراك منصباً على إنجاز مهمته التاريخية العظيمة، ألا وهي توطيد علم جديد، علم ميكانيك الكم، ربما كان ديراك أكثر الجميع إسهاماً فيه».

ولد ديراك عام 1902 في بريستول بإنكلترا، وكان الأوسط من بين ثلاثة أولاد في عائلة يمكن أن تُنعت اليوم بأنها استبدادية. كان والده قد هاجر من سويسرا إلى إنكلترا عام 1890، وهناك تزوج ابنة قبطان بحري. كان والده يعلّم لغته الأم، الفرنسية، في معهد مرموق في بريستول حيث كان يمارس سلطة حديدية. وكان يوجه أولاده بالصرامة نفسها: لم يكن مسموحاً لهم بالتعبير عن عواطفهم؛ أما الحب الأبوي فكان معناه الطاعة. كان يحيط أولاده بسور من

في عام 1931 كتب أحد المحاضرين في جامعة كامبردج، إلى أهله يقول:«كان قريب الشبه بالفكرة التي لدينا عن غاندي . لقد دعوناه إلى العشاء. كان عشاء لطيفاً متواضعاً لكنني متأكد من أن الأمر سيان لديه لو كنا قدمنا له حساء فقط. إنه يذهب إلى كوبنهاغن بالباخرة عبر بحر الشمال لأنه يعتقد أن عليه أن يشفى من دوار البحر. إنه لا يسعه أن يقول إلا ما يعتقد به حقاً. ولو أنه خُلق في عصر غاليليو لأصبح شهيداً سعيداً جداً».


إرفين شرودنكر

كان ديراك يتغدى ذات يوم بصحبة فكنر و(M. بولانيي)، فجرت مناقشة حامية حول العلم والمجتمع لم يتفوه خلالها ديراك بكلمة واحدة. ولما طُلب إليه أن يتكلم ويعطي رأيه أجاب:«يوجد دوماً أناس يحبون الكلام أكثر ممن يحبون الإصغاء».

وفي مناسبة أخرى كان ديراك يستضيف فيزيائياً فرنسياً يتكلم الإنكليزية بصعوبة وكان ديراك يصغي إليه وهو يفتش عن الكلمات الإنكليزية ليعبر عن رأيه. وكان أن دخلت الغرفة أخت ديراك وسألت أخاها شيئاً باللغة الفرنسية، فأجابها ديراك بالفرنسية بطلاقة، مما أثار بالطبع حنق الضيف فانفجر قائلاً«لماذا لم تخبرني بأنك تتكلم الفرنسية» فأجابه ديراك بأدب: «إنك لم تسألني قط».

وعندما مر ديراك بمدينة بيركلي وهو في طريقه إلى اليابان عام 1934 قابله (روبرت أوبنهايمر) وقدم له كتابين ليقرأهما في سفره. فرفض ديراك بأدب قائلاً بأن قراءة الكتب تشوش التفكير. وقد أهداه الفيزيائي الروسي (بيتر كابتزا) ذات مرة ترجمة إنكليزية لرواية (دستويفسكي): الجريمة والعقاب. وبعد مدة سأله كابتزا عما إذا كان قد استمتع بقراءة الكتاب، فلم يسمع منه سوى التعليق التالي:«إنه جيد، لكن الكاتب أخطأ في أحد الفصول حين تكلم عن شروق الشمس مرتين في يوم واحد». وقد قرأ أيضاً، بناء على توصية من أحد زملائه، رواية (تولستوي):«الحرب والسلم»، فاستغرق ذلك منه سنتين.


ج. روبرت أوبنهايمر

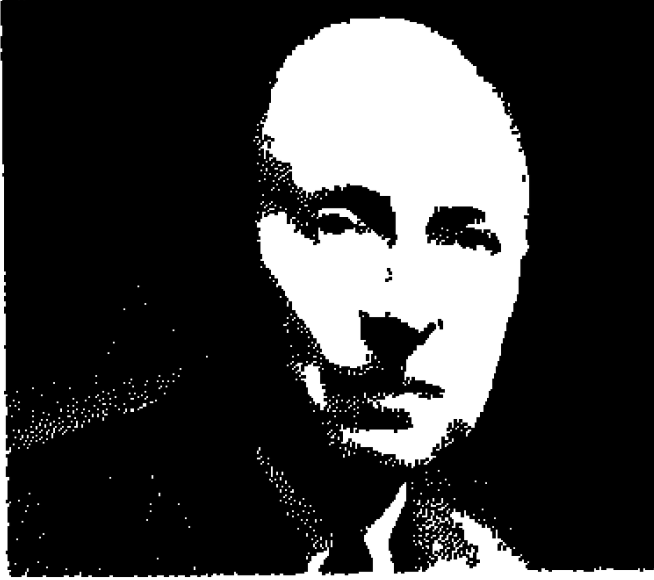
كان ديراك يتهرب من الدعاية. وقد خطر له في بادئ الأمر أن يرفض جائزة نوبل . كما أنه هرب إلى حديقة الحيوانات يوم تنصيبه أستاذاً في كامبردج، كي يتحاشى التهاني. كان يرفض كل أوسمة الشرف ـ و مع ذلك فقد مُنح كثيراً منها غيابياً ودون موافقة منه على ما يبدو.


بيتر كابتزا

وفي نحو عام 1950 عُيّن ديراك مشرفاً على أطروحة (دونيس شياما) في كامبردج، الذي دخل عليه ذات يوم يقول بحماس:«أستاذ ديراك، لقد فكرت منذ برهة بطريقة لربط تشكل النجوم بمسائل كونية، فهل لي أن أخبرك بها؟» فأجاب ديراك:«لا». وانتهى الحديث. ويبدو أن ديراك لم يكن يدرك أن إيجازه وصراحته يمكن أن تفهما ضرباً من الوقاحة أو الفظاظة.

كان ديراك في دروسه يجهد في عرض النصوص بأقصى الوضوح وبشكل مباشر. وكان يرى من غير المنطقي أن يغير جمله المختارة بعناية إذا كان السبب الوحيد أن السامع لم يفهمها، وقد حدث أكثر من مرة أن طلب إليه أحد الحاضرين أن يعيد التعبير عن فكرة لم يفهمها، قاصداً بذلك أن يسمع منه شرحاً أطول، لكن ديراك كرر ما قاله من دون أن يغير كلمة واحدة.

لقد كتب ديراك عام 1977 قائلاً:«أعتقد أن شرودنكر كان أكثر الفيزيائيين الذين قابلتهم قرباً مني. كنت أجد نفسي متفقاً معه بأسرع مما أتفق مع أي شخص آخر. وأظن أن سبب ذلك يعود إلى أننا كنا ، كلانا ، نستسيغ جداً جمال الرياضيات. كان ذلك ضرباً من الإيمان الراسخ لدينا بأن كل المعادلات التي تعبر عن القوانين الأساسية للطبيعة يجب أن تنطوي في جوهرها على جمال رياضياتي كبير».


أوجين فكنر

الاستبداد يعزلهم عن كل حياة اجتماعية وثقافية. ولما كان ديراك لم يستطع، أو لم يرغب، أن يثور على هذا الوضع فقد لجأ إلى أمان السكوت ونأى بنفسه عن أبيه. وقد تركت هذه السنون التعيسة بَصْمتها على حياة ديراك كلها. وعندما توفي والده، عام 1936، لم يحزن ديراك لوفاته وكتب إلى التي أصبحت زوجته يقول:«أشعر الآن أنني حر أكثر بكثير».

ولحسن الحظ كان لدى ديراك عالَم داخلي غني يلجأ إليه. فقد ظهرت عليه علائم النبوغ في الرياضيات في وقت مبكر؛ وقد انتسب إلى المدرسة التي كان يعمل فيها والده وهو ابن 12 عاماً. كانت هذه المدرسة، بخلاف معظم سواها من المدارس حينذاك، لا تقدم تعليماً تقليدياً للغة اللاتينية واللغة اليونانية، بل كانت تهتم بتعليم العلوم واللغات الحية والفنون التطبيقية. كانت هذه البرامج تلائم ديراك جيداً لأنه، كما يقول:«كان لا يستسيغ قيمة الثقافات القديمة». وبعد أن أتم برنامج هذه المدرسة الثانوية انتسب إلى معهد الهندسة في جامعة بريستول، حيث راح يؤهل نفسه ليصبح مهندساً كهربائياً، لا حباً بهذه المهنة بل ظناً منه أن ذلك قد يرضي أباه.

كان هذا التأهيل الهندسي لا يهتم بالموضوعات التي تخرج عن نطاق تطبيقات الفيزياء والرياضيات. وعلى الرغم من ذلك

أصبح ديراك مفتوناً، ثم مشبعاً بنظريات آينشتاين الجديدة بخصوص المكان والزمان والثقالة ــ أي بنظريتي النسبية: الخاصة والعامة.

وعندما نال ديراك شهادته الجامعية بدرجة الشرف الأولى عام 1921، كان يخشى ألا يجد عملاً بسبب الأزمة الاقتصادية التي تلت الحرب العالمية الأولى، لكنه أُسعف بمنحة لدراسة الرياضيات في بريستول، وفي نهاية عام 1923 بدأت دراسته العليا للرياضيات التطبيقية والفيزياء النظرية في جامعة كامبردج.

كانت كامبردج في ذلك الوقت موطن علماء مشهورين من أمثال (جوزيف لارمور) و(جوزيف تمسون) و(إرنست رذرفورد) و(أرثر ستانلي إدينكتون) و(جيمس جينز) ورجال علم صاعدين من أمثال (جيمس تشادويك) و(باتريك بلاكيت) و(رالف فاولر) و(إدوارد ميلن) و(دوكلاس هارتري) و(بيتر كابتزا). وقد تعلم ديراك من فاولر، الذي كان يشرف على أعماله، النظرية الذرية والميكانيك الإحصائي، وهما نظريتان لم يكن ديراك قد درسهما من قبل. وعن هذه السنوات قال فيما بعد:«لقد كرست نفسي كلياً لهذا العمل العلمي، واستمررت فيه يوماً بعد يوم، باستثناء يوم الأحد الذي خصصته للراحة أو للنزهة وحيداً ولمدة طويلة في الريف عندما يكون الجو جميلاً».

وبعد ستة أشهر من وصوله إلى الجامعة نشر ديراك أول أبحاثه العلمية، وفي السنتين التاليتين أتبعه بعشر نشرات. وعندما قدم أطروحته لنيل الدكتوراه، في الشهر 1926/5، كان قد اكتشف صياغة مبتكرة لميكانيك الكم وراح يلقي دروساً في أول مقرر أنشئ لهذا العلم في جامعة بريطانية. وبعد عشر سنوات فقط من دخوله جامعة كامبردج نال جائزة نوبل في الفيزياء على «اكتشاف أشكال جديدة خصبة لنظرية الذرات.. ولتطبيقاتها».

إن السنوات الثماني العظيمة من حياة ديراك بدأت ذات يوم من الشهر 1925/8، عندما تسلّم من فاولر نسخاً من مقالة كان (فرنر هايزنبرك)، الفيزيائي الألماني الشاب، ينوي نشرها [*انظر: «هايزنبرك والارتياب والثورة الكمومية»*] *انظر: مجلة العلوم، العدد 7 (1992) صفحة 45*. كانت هذه المقالة تحوي الأسس الرياضياتية لنظرية ثورية في الظواهر الذرية سرعان ما عُرفت باسم ميكانيك الكم. وعندئذ أدرك ديراك فوراً أن أعمال هايزنبرك تتيح تناولاً جديداً كل الجدة لعالَم الذرات. وفي غضون السنة التالية أعاد ديراك صياغة آراء هايزنبرك الأساسية وقدم نظرية مبتكرة في ميكانيك الكم أصبحت تعرف باسم جبر الأعداد q، وذلك وفقاً للتعبير الذي استخدمه ديراك للدلالة على المقادير الفيزيائية (القابلة للرصد) Observables، كالموقع أو الاندفاع أو الطاقة.

لقد حظيت أعمال ديراك بشهرة سريعة واسعة على الرغم من أن عدداً من نتائجه قد حصل عليها في الوقت نفسه فريق قوي من النظريين الألمان، منهم (هايزنبرك) و(ماكس بورن) و(وولفكانك باولي) و(باسكوال جوردان)، ممن كان ديراك ينافسهم بشكل علني.

كان بورن وهايزنبرك وجوردان يضعون أفكار هايزنبرك الأولى بشكل مصفوفات. ثم، وفي ربيع عام 1926، وضع الفيزيائي النمساوي (إرفين شرودنكر) نظرية كمومية أخرى، هي الميكانيك الموجي، قادت إلى النتائج نفسها، التي انبثقت عن النظريات الأكثر تجريداً المنسوبة إلى ديراك وهايزنبرك، لكن الحسابات في النظرية الجديدة هذه كانت أبسط. وقد شعر العديد من الفيزيائيين بأن هذه النظريات الثلاث ليست سوى (**تمثيلات**) Representations خاصة من نظرية في ميكانيك أوسع شمولاً.

وما لبث ديراك أن اكتشف هذه النظرية العامة أثناء الأشهر الستة التي قضاها في مؤسسة الفيزياء النظرية في كوبنهاغن، تلك النظرية التي كان يتوقعها الكثير من الباحثين ــ وهي إطار عام ينطوي على جميع الصيغ الخاصة ويعطي القواعد التي ترسم كيفية المرور من صيغة لأخرى. وهكذا أصبحت التطويرات اللاحقة في ميكانيك الكم تعتمد على (**نظرية التحويل**) Transformation Theory التي ابتدعها ديراك وعلى نظرية مماثلة أخرى ابتدعها جوردان في الوقت نفسه تقريباً.

وفي 1927/12/26 كتب الفيزيائي الإنكليزي (تشارلس داروين) (حفيد عالم الطبيعة المشهور) إلى بور يقول:«كنت في كامبردج منذ بضعة أيام ورأيت ديراك. لقد حصل الآن على منظومة جديدة كاملة من المعادلات تأخذ بعين الاعتبار (سبين)Spin الإلكترون في كل الأحوال ويبدو أنها «الضالة المنشودة»، وهي معادلات تفاضلية من المرتبة الأولى، لا الثانية».

كانت معادلة ديراك بالفعل «الضالة المنشودة» لأنها كانت تنسجم، دفعة واحدة، مع متطلبات نظرية النسبية الخاصة ومع النتائج التجريبية بخصوص سبين الإلكترون، هذا السبين الذي يمكن أن يأخذ إحدى القيمتين، ½ + و ½ - ، على حد سواء. وكانت معادلة شرودنكر الأصلية قد فشلت في هذا المضمار لأنها لم تكن نسبوية ولأن تعميمها النسبوي، أي معادلة كلاين ــ كوردون، لم يستطع أن يأخذ السبين في الحسبان.

كان استخدام المشتقات الأولى حصراً، الذي أدهش داروين، حاسماً لسببين. أولهما أن ديراك أراد أن يحتفظ بالشكل البنيوي لمعادلة شرودنكر التي كانت تحوي المشتق الأول بالنسبة للزمن. والآخر أن ديراك كان يريد أن يستجيب لمستلزمات النسبية التي تضع المكان والزمان على قدم المساواة. كان التوفيق بين هذين المطلبين، على صعوبته، جميلاً ومفيداً في وقت واحد: فعندما طبق معادلته الجديدة على إلكترون متحرك في حقل كهرطيسي عثر ديراك على قيمة سبين الإلكترون بشكل آلي.

لقد أعجب الفيزيائيون باستنتاج خاصية فيزيائية من مبادئ أولـــى أســـاسية، فنعتـــوا المعادلة بأنها «معجزة وأعجوبة مطلقة»

It seems reasonable to assume that not all the states of negative energy are occupied, but that there are a few vacancies or 'holes'. (which can be described by a wave function, like an X-ray orbit) Such a hole would appear experimentally as a thing with +ve energy, since to make the hole disappear (i.e. to fill it up) one would have to put −ve energy into it. Further, one can easily

إن فكرة المادة المضادة، التي اقترحها ديراك عام 1931، نشأت مباشرة عن نظرية الثقوب التي ابتدعها وعبر عنها في رسالة بعث بها إلى نيلز بور في 1929/11/26، إنها تنبئ بوضوح أفكار ديراك ودقتها، ويقول فيها:«يبدو من المعقول أن نفترض أن حالات الطاقة السالبة ليست كلها مشغولة، بل إن هناك بضعة شواغر، أو «ثقوب» يمكن توصيفها بدالة موجية، مثل مدار أشعة سينية. ومن شأن كل ثقب من هذا القبيل أن يظهر تجريبياً بشكل شيء ذي طاقة موجبة لأننا إذا أردنا زوال الثقب (أي أن نملأه) علينا أن نودع فيه طاقة سالبة. زد على ذلك أننا نستطيع بسهولة».

وراحوا يضطلعون بتحليل دقائقها. وكان أن قاد هذا الطريق الجديد إلى ولادة (التحليل السبيني) Spinor Analysis — وهو أداة رياضياتية فعالة في تحليل مسائل تنتمي إلى مجالات الفيزياء جميعها تقريباً — وإلى تطوير المعادلات الموجية النسبوية بما يناسب الجسيمات التي يختلف سبينها عن النصف. وقد حققت هذه المعادلة نجاحاً آخر عندما طبقها ديراك وآخرون على ذرة الهيدروجين حيث استطاعوا أن يعثروا على خطوطها الطيفية في أمكنتها بالضبط. وبعد أقل من سنة من نشرها أصبحت معادلة ديراك على ما هي عليه اليوم: أحد أسس الفيزياء الحديثة.

كان ديراك يبجّل المنطق الرياضياتي، وكان في الوقت نفسه ذا حدس قوي. ولم تكن هاتان الصفتان الفكريتان، المتناقضتان ظاهرياً، تتجليان بأبرز مما تجلتا في تطوير نظريته في «الثقوب» بين عامي 1929 و1931، هذه النظرية التي أضاءت عالماً بكامله كان من قبل خفياً عن عيون الفيزيائيين.

لقد انبثقت هذه النظرية عن إدراكه بأن معادلته لا تنطبق على الإلكترونات ذات الطاقة الموجبة فحسب، بل وعلى الإلكترونات ذات الطاقة السالبة أيضاً. أي إن أمثال هذه الجسيمات لابد أن تبدي صفات خاصة جداً. زد على ذلك أن الجسيمات ذات الطاقة الموجبة من شأنها أن تسقط في تلك الحالات ذات الطاقة السالبة، متسببة في انهيار العالم المحيط بنا.

وفي أواخر عام 1929 وجد ديراك طريقة لحل اللغز الناشئ عن ضرورة وجود إلكترونات ذات طاقة سالبة في الطبيعة، فتصور أن الخلاء «بحر» قوامه حالات سالبة الطاقة «مليئة» كلها بالإلكترونات. وبموجب مبدأ باولي في (الانتفاء) Exclusion، هذا المبدأ الذي ينفي وجود إلكترونين اثنين في حالة كمومية واحدة، يكون من شأن الإلكترونات ذات الطاقة السالبة أن تظل فوق هذا البحر الخفي فتشكل الحالات «المثارة» الملحوظة في الطبيعة. وفي وسع الحالة المثارة أن تنشأ عن حقن طاقة موجبة في هذا البحر كافية لنزع إلكترون منه، فيصبح من شأن ذلك أن يتولد «ثقب» يمكن أن يسقط فيه إلكترون آخر ذو طاقة سالبة. وقد كتب ديراك بهذا الصدد يقول:«إن هذه الثقوب ستكون أشياء ذات طاقة موجبة وسوف تشبه، من هذه الناحية، الجسيمات العادية».

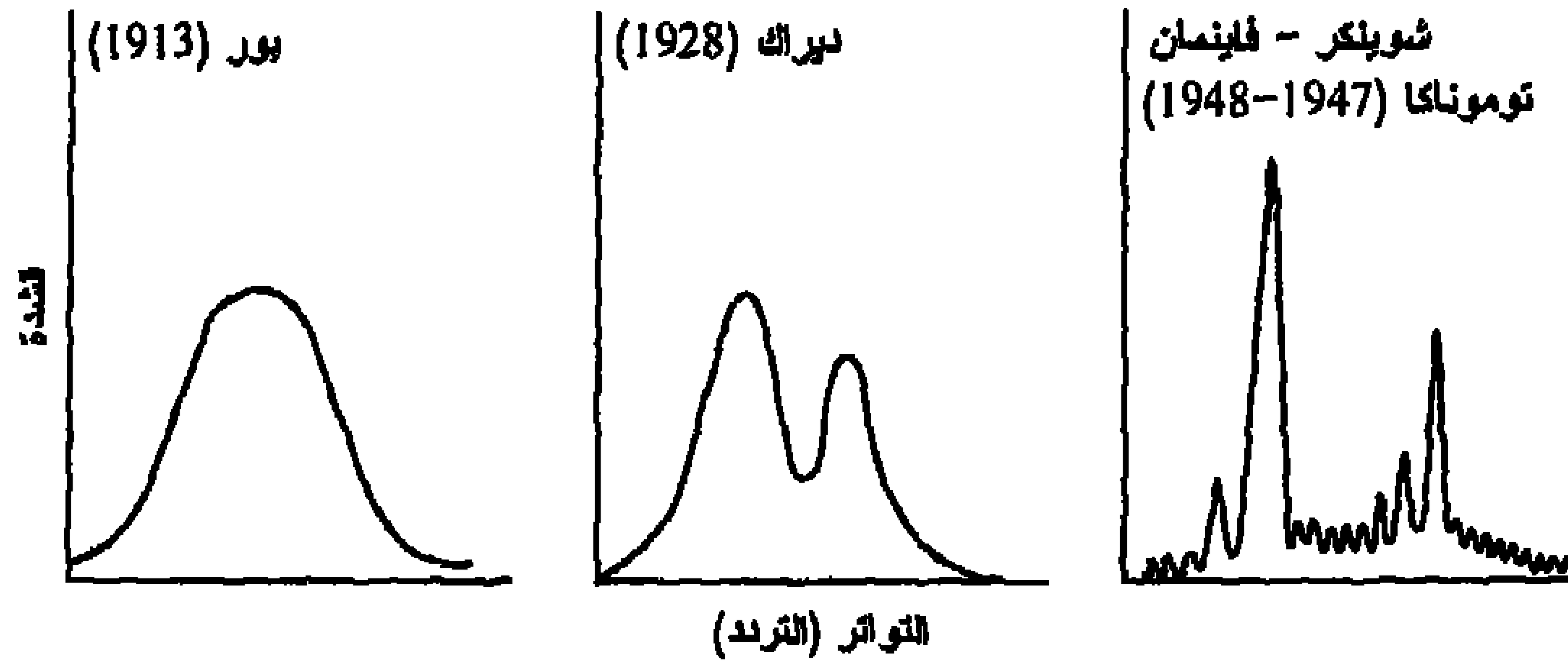
ولكن ما هو الجسيم الذي يجسّد هذا الثقب؟ كان يوجد وقتذاك جسيمان مرشحان لهذه الوظيفة فكّر فيهما ديراك: البروتون والإلكترون السالب. أما البروتون فقد تبين فوراً لديراك أنه ينطوي على صعوبتين مهمتين، أولاهما أن المتوقع من الإلكترون، إذا سقط في أحد الثقوب، أن يتفانى مع الجسيم الآخر الذي يجسد هذا الثقب وأن ينشأ عن تفانيهما برق ضوئي خاطف (أشعة غاماوية) Gamma Rays. لكن شيئاً من قبيل تفاني الإلكترون مع البروتون لم يُلحظ قط. أما الصعوبة الأخرى فهي ما اتضح من أن المرشح الملائم المطلوب يجب أن يماثل الإلكترون في كل شيء باستثناء الشحنة الكهربائية — إضافة إلى أن كتلة البروتون تساوي قرابة 2000 مرة من كتلة الإلكترون.

كان ديراك ميالاً في بادئ الأمر، بدافع من رغبته في البساطة، إلى تفضيل البروتون كمجسد للثقب، لأن الإلكترون والبروتون كانا، في عام 1930، الجسيمين الأساسيين الوحيدين المعروفين. ولم يكن راغباً في إدخال كائن جديد لم يلحظه أحد قط. زد على ذلك أن عدد الجسيمات الأساسية سيؤول إلى جسيم واحد، هو الإلكترون، إذا أمكن اعتبار البروتون حالة ذات طاقة سالبة يُخلّفها الإلكترون. كانت مثل هذه البساطة ستحقق، حسب قوله، «حلم الفلاسفة».

لكن الاعتراضات التي سيقت ضد تفسيره الأولي للثقوب سرعان ما اشتدت وتكاثرت لدرجة أن استقر رأيه، في الشهر 1931/5 — وعلى كره منه — على المرشح الثاني: الإلكترون المضاد،«وهو نوع جديد من الجسيمات لا يعرفه التجريبيون، كتلته تساوي كتلة الإلكترون وشحنته تخالف بالإشارة شحنة الإلكترون».

التنبؤ بالخط ألفا في طيف الهيدروجين

إن الخط ألفا في طيف الهيدروجين يدل بوضوح على التقدم الذي أحرز في النظرية الذرية منذ أن أعطى نيلز بور أول تفسير له، عام 1913 وهو أنه ناجم عن انتقال كمومي واحد. وعندما كشفت التجارب المحسّنة وجود بنية ناعمة في الخط ضم (سمرفلد) نظرية بور الذرية إلى نظرية أينشتاين النسبوية الخاصة كي يفسر هذه المركبات على أساس أنها نتيجة عدة انتقالات. وقد فشلت محاولات استنباط نتائج سمرفلد من الميكانيك الكمومي الجديد إلى أن جاءت، عام 1928، نظرية ديراك في الإلكترون وبرهنت على أنها تؤدي بالضبط إلى معادلة سمرفلد القديمة. لكن القياسات اللاحقة أسفرت عن بنية أنعم من ذي قبل تفسرت نظرياً في أواخر الأربعينيات بالإلكتروديناميك الكمومي الجديد الذي ابتدعه شوينكر وفاينمان وتوموناكا. كان ديراك ينفر من هذه النظرية الجديدة لأنها، حسب قوله، «ليست سوى مجموعة قواعد عمل». لا نظرية مكتملة مبنية على أساس «سليم وجميل».



وقد دعاه هذا التناظر، بين الشحنة الموجبة والشحنة السالبة، في نظريته إلى القبول بالبروتون المضاد في مملكة الموجودات النظرية. وبذلك عمد ديراك إلى مضاعفة عدد الجسيمات الأساسية (الأولية)، وفسح مجالاً للتكهنات بوجود عالم كامل مصنوع كله من المادة المضادة. كما أنه افترض وجود جسيم آخر، هو وحيد القطب المغنطيسي، الذي لابد أن يكون ذا شحنة مغنطيسية من نوع واحد، وذلك تشبهاً بشحنة الإلكترون أو شحنة البروتون الكهربائية. لكن لا يوجد اليوم أي برهان تجريبي موثوق على وجود وحيدات قطب مغنطيسي [انظر:

«Superheavy Magnetic Manopoles», by R.A.Carrigan, Jr.- W.P.Trower; *Scientific American*, April 1982].

وفي الشهر 1932/9، انتخب ديراك ليحتل كرسي الرياضيات، الذي كان يحتله نيوتن في جامعة كامبردج لمدة ثلاثين عاماً، واحتفظ به 37 عاماً (يحتله الآن ستيفن هوكنك). وفي ذلك الشهر عرض فيزيائي شاب اسمه (كارل أندرسون) من معهد كاليفورنيا التقاني (CIT)، في بحث نشر في مجلة (سايِنس) *Science*، ما بدا له ـ في الأشعة الكونية ـ إلكتروناً موجب الشحنة وذا كتلة تضاهي كتلة الإلكترون». وعلى الرغم من أن هذا الاكتشاف لم يكن مستوحى من نظرية ديراك، فقد صار هذا الجسيم الذي سُمي «بوزترونا» يعتبر عموماً إلكترون ديراك المضاد. وعندما تسلم ديراك جائزة نوبل في ستوكهولم، في الشهر 1933/12، كان عنوان محاضرة ذلك الفيزيائي الشاب حيث كان عمره 31 عاماً: «نظرية الإلكترونات والبوزترونات». وبعد ثلاث سنوات نال أندرسون، وكان عمره 31 عاماً أيضاً، جائزة نوبل على انتزاعه جسيم ديراك من مملكة المفترضات.

إن النظرية الكمومية التي تُعنى بالحقل الكهرطيسي تسمى اليوم الإلكتروديناميك الكمومي. وفي أواسط الثلاثينيات بلغت قضية صياغة نظرية كمومية نسبوية مقبولة مرحلة الأزمة، فاستنتج عدد من الفيزيائيين أن من الضروري إجراء تغيير حاسم في أسس الفيزياء. كان ديراك، من المساهمين الرئيسيين في الإلكتروديناميك الكمومي في أواخر العشرينيات، وكان مشمئزاً من العيوب التي كانت تشوب الإطار النظري القائم الذي كان مبنياً على نظرية طرحها هايزنبرك وباولي عام 1929 ونعتها ديراك بأنها «بشعة» وغير منطقية. زد على ذلك أن الحسابات التي تستخدم هذه النظرية قادت إلى تكاملات متباعدة ـ لانهائيات ـ لم يستطع أحد أن يجد لها معنى فيزيائياً. وفي عام 1936 وضع ديراك نظرية بديلة لم تكن الطاقة فيها (منحفظة) Conserved. وعلى الرغم من أن هذا الاقتراح الجذري واجه تعارضاً سريعاً مع التجارب، استمر ديراك في انتقاد نظرية هايزنبرك وباولي وفي البحث ـ بعناد تقريباً ـ عن نظرية أفضل. وقد كتب عام 1979 معلقاً على أعماله السالفة: «لقد قضيت عمري في البحث عن معادلات أفضل للإلكتروديناميك الكمومي، ومازلت بعيداً جداً عن النجاح، لكنني مستمر في هذه المهمة».

إن الانطلاق من نظرية تقليدية محسّنة في الإلكترون كان أحد الطرق المنطقية التي يجب اتباعها للحصول على نظرية أفضل في الإلكتروديناميك الكمومي. وباتباع هذا الأسلوب عام 1938، حصل

ديراك بخصوص الإلكترون على نظرية تقليدية ــ نسبوية أدخلت تحسيناً كبيراً على النظرية القديمة التي كان (لورنتز) قد رسم إطارها في أوائل القرن. لقد أفضت نظرية ديراك إلى معادلة صحيحة لحركة الإلكترون على أساس أنه جسيم نقطي. ولما كانت هذه النظرية تتحاشى اللانهائيات وسواها من الحدود الرديئة التعريف فقد بدت قادرة على إعطاء إلكتروديناميك كمومي نظيف من التكاملات المتباعدة. لكن تبين أن صياغة نسخة مقبولة من الميكانيك الكمومي، بالاعتماد على هذه النظرية، أمر صعب مما كان يظن ديراك فظل يكافح لحل هذه الصعوبات أكثر من عشرين عاماً دون جدوى.

وكان أن ظهرت بين عامي 1947 و1948 نظرية جديدة في الإلكتروديناميك الكمومي أتاحت للفيزيائيين التفافاً عملياً على مصاعب اللانهائيات التي كانت تعطِّل العمليات الحسابية. فقد اقترح رواد هذه النظرية، وهم (توموناكا) في اليابان و(فاينمان) و(شوينكر) و(دايسون) في الولايات المتحدة، طريقة تسمى (إعادة الاستنظام) Renomolization يتم وفقها إبدال القيم التجريبية المقيسة لكتلة الإلكترون وشحنته بالكميات اللانهائية التي تظهر في الحسابات النظرية. وقد تبين أن استبعاد تلك اللانهائيات بهذه الطريقة يؤدي إلى نبوءات بالغة الدقة. وكان من شأن النجاحات العملية العديدة لهذه النظرية أن أقنعت الفيزيائيين بتبني إعادة الاستنظام طريقة للعمل في الإلكتروديناميك الكمومي.

ومع ذلك ظل ديراك يعارض طريقة إعادة الاستنظام معتبراً إياها «معقدة وبشعة» على غرار سابقتها، نظرية هايزنبرك وباولي، وذلك ــ حسب رأيه ــ لأن النظرية، التي تعمل باحتيالات رياضياتية مقصودة غير مستمدة مباشرة من مبادئ فيزيائية أساسية، لا يمكن أن تكون نظرية جيدة مهما بلغت جودة اتفاقها مع النتائج التجريبية. لكن اعتراضاته لم تلق صدى يذكر. وقد اعترف في أواخر حياته بأنه لم يصبح معزولاً بين أقرانه فحسب بل وبأنه أخفق في كل محاولاته لبناء إلكتروديناميك كمومي آخر.

وعلى الرغم من ذلك كان لكفاح ديراك، في سبيل الحصول على نظرية حقل كمومية بديلة، نتائج مهمة، كانت إحداها نظريته التقليدية المهمة في الإلكترون التي جئنا على ذكرها. ومنها أيضاً أنه أدخل رمزاً صياغياً جديداً، يعرف باسم (براكيت) Bracket، كان من شأنه أن منح هذه الموضوعات المقدرة الرياضياتية (للفضاءات المتجهة) Vector Spaces (التي يسميها بعضهم «فضاءات هلبرت»)، فكان أن أصبحت هذه الصياغة واسعة الانتشار بفضل الطبعة الثالثة لكتابه (1947): «مبادئ ميكانيك الكم» وغدت اللغة الرياضياتية الفضلى في هذا الميدان.

لما كان اهتمام ديراك يقتصر، عموماً، على مجالات خاصة، إلى حد ما، من الفيزياء الكمومية فقد أدهش أقرانه حين تدخل عام 1937 في علم الفلك بفكرة جديدة طورها بعدئذ إلى نموذج محدد للكون. كان اهتمامه هنا مستمداً في معظمه من اثنين من أساتذته السابقين، هما ميلن وإدينكتون، ومن مناقشات مع الفيزيائي الفلكي الهندي الموهوب (سبرامنيان تشندرا سيخار)، الذي كان ديراك يشرف على أطروحته جزئياً. ففي أوائل الثلاثينيات اضطلع إدينكتون ببرنامج بحث طموح غير تقليدي يهدف إلى استنباط الثوابت الأساسية في الطبيعة وذلك بإقامة جسر بين نظرية الكم وعلم الفلك. كان هذا البحث عن «نظرية أساسية»، كما سماها إدينكتون، يوسع مجال التفكير العقلاني إلى دنيا التكهن الميتافيزيائي ــ عملية نعتها أحد النقاد بأنها «تجمع بين شلل العقل وتسميم الخيال». كان ديراك يشك في نجاح ادعاءات إدينكتون التخيلية لكنه كان مبهوراً بفلسفته العلمية التي تؤكد مقدرة المحاكمة الرياضياتية البحتة، وباعتقاده بوجود صلة أساسية بين العالَم الماكروي (الصغري) والعالَم الماكروي (الكبري).

وفي أول نشرة له في علم الفلك ركَّز ديراك اهتمامه على الأعداد الكبيرة «البحتة» جداً، أو العديمة الأبعاد. التي يمكن تشكيلها بضم الثوابت الأساسية جبرياً (كثابتة التثاقل وثابتة بلانك وسرعة الضوء وشحنة الإلكترون والبروتون وكتلتيهما) بما يجعل وحدات قياسها تُختزل في التقسيم. وكان يدَّعي أن هذه الأعداد الكبيرة وحدها تمتلك معنى عميقاً في الطبيعة.

كان ديراك يعلم مثلاً أن نسبة القوة الكهربائية، بين إلكترون وبروتون إلى القوة التثاقلية بين الجسيمين نفسهما، تساوي عدداً كبيراً جداً، زهاء 10^{39}. وقد لاحظ، متعجباً، أن هذا العدد يساوي تقريباً عمر الكون (كما كان يُقدر حينذاك) عندما يُعبَّر عن هذا العمر بوحدة زمنية ملائمة، كالفترة التي يقتضيها الضوء ليقطع قطر إلكترون تقليدي.

كان ديراك يعرف عدة علاقات من هذا القبيل بين أعداد بحتة كبيرة. لكنه بدلاً من أن يعتبرها مصادفات محضة، ادعى أنها تشكل روح مبدأ كوني جديد مهم سماه (فرضية الأعداد الكبيرة) The Large Number Hypothesis: «إن أي اثنين من الأعداد الكبيرة جداً والعديمة الأبعاد الموجودة في الطبيعة يتصلان بعلاقة رياضياتية بسيطة أمثالها (معاملاتها) من رتبة الوحدة».

ومن هذا المبدأ استنتج ديراك فورياً ــ وجدلياً ــ بأن «ثابتة التثاقل»G، متناسبة عكسياً مع عمر الكون وأنها يجب إذاً أن تتناقص باستمرار مع تزايد عمر الكون.

وفي عام 1938 استنبط ديراك من فرضية الأعداد الكبيرة عدة نتائج يمكن اختبارها عملياً وبنى نموذجه الخاص للكون معتمداً على ذلك المبدأ. لكن معظم الفيزيائيين والفلكيين ــ الذين تزايد امتعاضهم من التناول العقلاني لعلم الكون ــ رفضوا أفكار ديراك هذه. وبعد عدة عقود، أي في السبعينيات، استأنف ديراك عمله في علم الكون مستنداً أساساً إلى نظريته الأصلية. فدافع عن فرضية الأعداد الكبيرة وعن نبوءة تغير الثابتة التثاقلية ضد بعض المآخذ

المعتمدة على الأرصاد. وحاول أن يعدّل في هذا النموذج كي ينسجم مع الاكتشافات الجديدة كاكتشاف الخلفية الإشعاعية المكروية الكونية. لكن جهوده هذه أخفقت في اكتساب التأييد، فبقي ديراك ــ في علم الكون كما في الإلكتروديناميك الكمومي ــ شخصاً معزولاً عن تيار البحوث الأساسية.

كان ديراك ملتزماً بأعماله وحدها، ومنذ زمن طويل كان زملاؤه ينظرون إليه وكأنه عَزَب عنيد. ولذلك دهشوا كلهم عندما تزوج، عام 1937 من (ماركيت فكنر) أخت الفيزيائي الهنغاري المشهور (أوجين فكنر) كانت ماركيت هذه أرملة ولها صبي وبنت من زوجها الأول، ثم ولدت ابنتين لديراك. ومع ذلك ظل ديراك انعزالياً عن الحياة العائلية. وقد كتبت عنه زوجته تقول:«إن من سخرية القدر وحده أن يعاني بول صعوبات مع عائلته وهو الذي كابد كثيراً من هذه الصعوبات نفسها مع أبيه. ومع أن بول لم يكن أباً متسلطاً، إلا أنه ظل معزولاً جداً عن أولاده. ولئن كان التاريخ يعيد نفسه، فإن حياة ديراك العائلية مثال حي على هذه المقولة».

لم يكن ديراك يبدي أي اهتمام بالفنون، لا بالموسيقى ولا بالآداب، ونادراً ما كان يذهب إلى المسرح. كانت هواياته الوحيدة تنصب على السفر والتجوال في الجبال. كان لا يتعب من المشي. وكان كثيراً ما يبدي في نزهاته جَلَداً أدهش كل من عرفه من خلال محاضراته أو الولائم الرسمية. وقد دار حول العالم ثلاث مرات وتسلق عدداً من أعلى القمم الجبلية في أوروبا وأمريكا.

وفي عام 1969 توقف عن التدريس في كامبردج. وبعد سنة قرر مع زوجته أن يهاجرا إلى فلوريدا نهائياً للاستمتاع بدفء جوها. وهناك وافق على وظيفة عرضتها عليه جامعة فلوريدا. وظل يعمل بنشاط ويسهم في كثير من المؤتمرات إلى أن بدأت صحته تعتل، وتوفي هناك في الشهر 1984/10.

المؤلفان

R. Corby Hovis – Helge Kragh

يتعاونان منذ عام 1987 في عدة مشروعات في تاريخ الفيزياء الحديثة. يدرس هوفيس تاريخ علم الكون (الكوسمولوجيا) وفيزياء الجسيمات في مركز الراديوفيزياء وأبحاث الفضاء الخارجي في جامعة كورنيل، كما يسهم في التطوير العصري لنظرية التثاقل. أما كراف فعمل أستاذاً مساعداً في التاريخ والفيزياء بجامعة كورنيل من عام 1987 إلى 1989، وعاد بعدها إلى الدانمرك، موطنه الأصلي. يعمل حالياً مع زملاء آخرين في تاريخ التقانة في الدانمرك. وكان قد بدأ، هو الآخر، ببحوث في تاريخ علم الكون بين عامي 1945 و1960.

مراجع للاستزادة

The Historical Development of Quantum theory, vol. 4, part 1: The Fundamental Equations of Quantum Mechanics, 1925-1926. Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg. Springer-verlag, 1982.

Paul adrien Maurice Dirac. R. H. Dalitz and Sir Rudolf Peierls in *biographical memoris of fellows of the royal society*, vol. 32, pages 137-185; 1986.

Reminiscences about A Great Physicist: Paul Adrien Maurice dirac. Edited by Behram N. Kursunoglu and Eugene P. Wigner. Cambridge University Press, 1987.

Dirac: A Scientific Biography. Helge Kragh, cambridge university press, 1990.



مناورات نيلز بور الذرية

هل أطلع بور آخرين على أسرار نووية؟

تقابل نيلز بور مع موظف سوفييتي في نهاية عام 1945. وعلى الرغم من أن البعض قد اتهم بور بإفشاء أسرار نووية، فقد وفرت مذكرة اكتشفت حديثاً البرهان على عكس ذلك.

(هـ.أ. بيته). (ك. كوتفريد). (ر.ز. ساكديف)



لا يرتبط اسم نيلز بور بالفضائح، بل بالعبقرية وسمو الشخصية. يعدّ بور ـ الفيزيائي الفائز بجائزة نوبل وأول من وصف الذرة باستخدام ميكانيك الكم ـ أحد عمالقة العلم في القرن العشرين. وخلال الحرب العالمية الثانية، عارض بور الاحتلال النازي لوطنه الدانمرك وأسهم وهو لاجئ في (مشروع مانهاتن Manhattan Project) الذي وفّر للولايات المتحدة القدرة النووية الفائقة. ومع ذلك، كان بور مؤيداً قوياً للتعاون الدولي، وقد ألح على روزفلت وتشرشل أن يزوّدا الدول الأخرى بمعلومات عن القنبلة، وذلك من أجل تحقيق السلم العالمي.

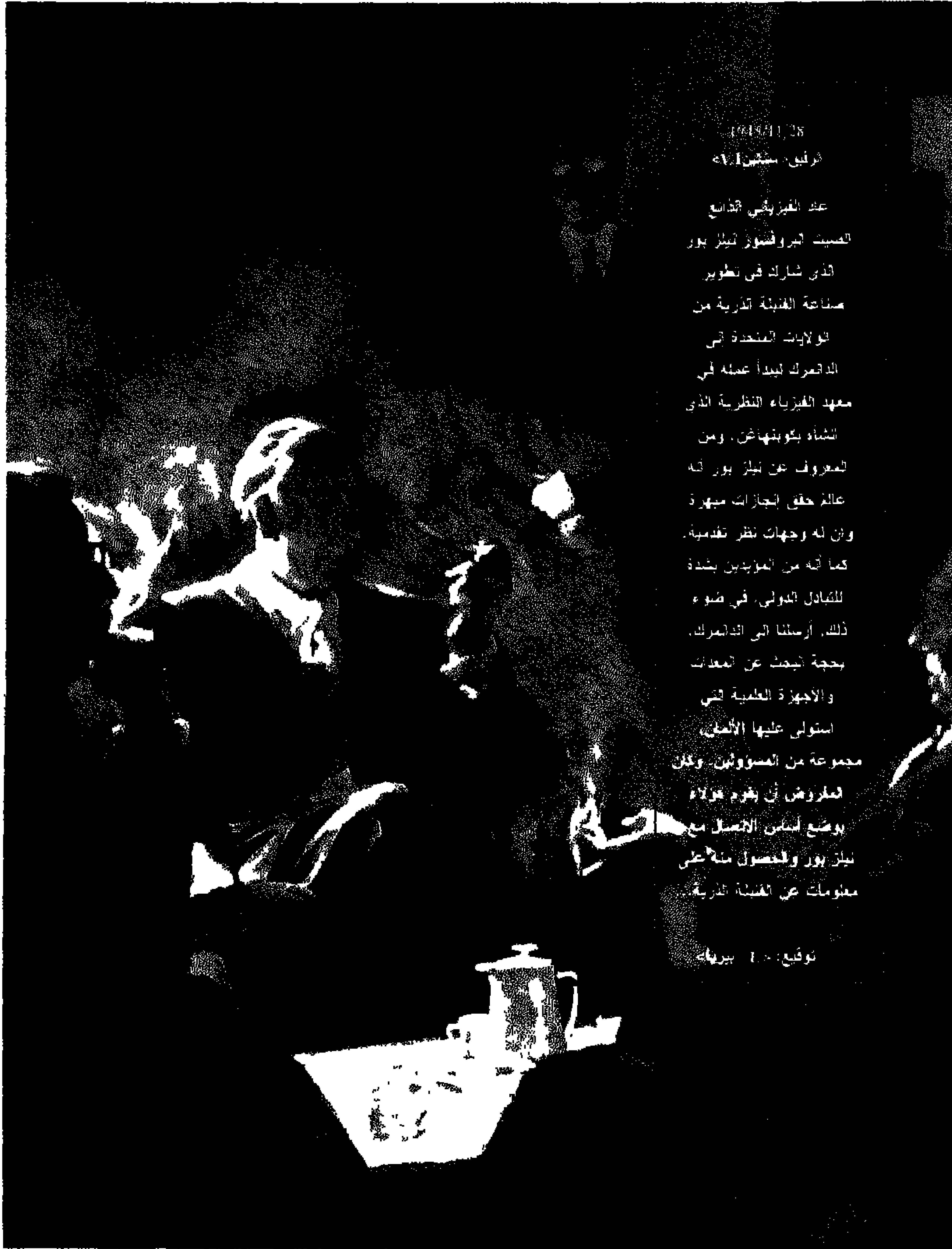
هل كان ممكناً أن يتصرف بور تصرفاً انفرادياً في إطار هذه المعتقدات؟ في عام 1994 ادعت بعض المصادر ذات المكانة المرموقة علناً أن بور أعطى معلومات محظورة عن البرنامج الأمريكي للقنبلة إلى عملاء سوفييت. وتركزت الشكوك على لقاء تم عام 1945 بين بور وممثلين عن الشرطة السرية.

وكما سيتضح من بداية المقالتين التاليتين، فإن هذه الشكوك لا أساس لها. يستعرض المؤلفون، وهم فيزيائيون ذائعو الصيت، الظروف التي قادت إلى اللقاء، ويثبتون أن بور لم يحاول قط إخفاء هذا اللقاء عن المسؤولين، فضلاً عن ذلك، يشيرون إلى مذكرة رُفعت إلى ستالين تتضمن سجلاً للمحادثة وتوضح أن بور ظل، عن قصد، غامضاً بالنسبة لما يعرفه. ولا بد أن تساعد المكانة العلمية المرموقة لهؤلاء المؤلفين على إزالة ما يكون قد علق بسمعة بور الطيبة. وتلقي المقالة الثانية الضوء على إحدى مراحل حياة بور، وهي مرحلة تثير الإعجاب، ولو أنها غير معروفة بالدرجة نفسها، وخلالها وفر بور للحلفاء معلومات مهمة وأساسية عن البرنامج النازي الخاص بالأسلحة النووية. يقتفي المؤلف، وهو فيزيائي انقلب إلى مُخبر سري، الأثر الذي امتد 50 عاماً ليكشف ما إذا كان العالم الألماني (ف. هيزنبرك) قد سلم بور رسماً تخطيطياً لجهاز نووي. وهذه القصة هي تذكرة مهمة لمرحلة ليست بعيدة، كانت موازين القوى وأعمال التجسس خلالها تؤثر في عمل كل فيزيائي يدرس أسرار الذرة.

* * *

«جاءت أكثر المعلومات أهمية لصنع أول قنبلة ذرية سوفييتية من العلماء الذين صمموا القنبلة الذرية الأمريكية في لوس ألاموس.. لقد وافقوا على اقتسام معلومات الأسلحة النووية مع العلماء السوفييت..»

جاء هذا الادعاء المثير في كتاب (المهام الخاصة Sepecial Tasks) الصادر عام 1994، والذي يتمادى إلى حد اتهام بور وغيره من العلماء المشهورين ـ الذين شاركوا في مشروع مانهاتن ـ بإعطاء الجواسيس السوفييت معلومات سرية عن المجهود الأمريكي لصنع قنابل نووية. والكتاب مبني على معلومات (ب. سودبلاتوف) (أحد أفراد الشرطة السرية الرفيعي المستوى التابعين للرئيس ستالين). والكتاب لا يوثق اتهاماته الخطيرة بأي براهين تثبت صحتها. وعلى الرغم من ذلك، أثار نشر الكتاب جدلاً حاداً حول صدق هذه الادعاءات.



تبين الصورة اللقاء الذي تم بين (ن. بور) وموظف المخابرات السوفييتية (إ. ترلتسكي) (في اليمين) كما تخيله أحد الفنانين. تمت الزيارة في الشهر 1945/11 في مكتب بور بكوبنهاغن. أحضر ترلتسكي مترجماً معه (في اليسار)، وكان مع بور اثنان من أبنائه، إرنست (في أقصى اليمين) وكان واقفاً للحراسة في غرفة مجاورة ومعه مسدس معدٌ للإطلاق، وآغ (واقف) الذي بقي في غرفة الاجتماع. رُفعت مذكرة لجوزيف ستالين (توجد ترجمة لجزء منها في الإطار بالصورة) تحتوي على مضبطة للمحادثة بين بور وترلتسكي. توجد أجزاء من المضبوطة ضمن ما هو مؤطر في الصفحات التالية.

لقد رُفع الحظر منذ وقت غير بعيد عن مذكرة من محفوظات المخابرات السوفييتية (المعروفة بالـKGB) كانت قد رُفعت لستالين. وتتضمن الوثيقة ما يفترض أنه نص حرفي لما دار في الاجتماع الذي عُقد في الشهر 1945/11، والذي يدعي أن بور قدم فيه للسوفييت معلومات محظورة. لقد راجعنا هذه الوثيقة مراجعة دقيقة للغاية، ووجدنا البرهان على أن الاتهامات الموجّهة لبور هي اتهامات زائفة.

يتعذر فهم الجدل المثار، وأيضاً تحليلنا للمذكرة، إلا إذا كان للقارئ بعض الإلمام بتطور الفيزياء النووية قبل الحرب وبالجهود التي بُذلت لتطبيق المعرفة العلمية الناتجة للأغراض العسكرية خلال الحرب العالمية الثانية. لقد تحقق العلماء في أوائل القرن الحالي من أن الذرة تتكون من إلكترونات تدور في مسارات حول نواة تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة. وكانوا يعلمون أيضاً أن الطاقة داخل النواة أكبر ملايين المرات من الطاقة التي تتحرر من التفجيرات الكيميائية. ولكن لم يكن معلوماً إلا القليل عن تركيب النواة إلى أن اكتشف (ج. شادويك) النيوترون عام 1932، وكان يعمل في جامعة كامبردج. وقد أوضحت بحوث شادويك أن النوى تتركب من بروتونات ونيوترونات.

وبسرعة، أصبح النيوترون مجساً حاسماً لاكتشاف خواص النواة، ولأن النيوترونات لا تحمل شحنة كهربائية فإن النوى الموجبة الشحنة لا تطردها، وبالتالي يمكن للنيوترونات أن تدخل بسهولة في نوى العديد من العناصر، وتسمى هذه العملية أسْر النيوترونات. وقد دُرست تفاعلات نووية كثيرة تتضمن أسرا للنيوترونات ولكن لم ينتج من أي منها تغيرات مثيرة في النوى.

ومع ذلك، ففي عام 1938، شاهد (و. هان) و(ف. ستراسمان)، وكانا يعملان في معهد القيصر ويلهلم ببرلين، تفاعلاً غريباً يتضمن

حديث في كوبنهاغن

المقتطفات التالية هي من المناقشة التي تمت بين ترلتسكي وبور مأخوذة من ترجمة للمضبطة التي أرسلت لستالين عام 1945. ويمكن الحصول على المضبطة كاملة من ساينتفيك أمريكان على (أمريكا باتصال مباشر) America Online.

ترلتسكي: ما الطريقة العملية التي استُخدمت للحصول على كميات وفيرة من اليورانيوم 235، وما الطريقة التي تبشر بالنجاح أكثر من غيرها (الانتشار أو المغنطيسية أو غيرهما)؟

بور: إن نظرية الحصول على اليورانيوم 235 معروفة جيداً لعلماء جميع الدول، وقد تم إنجازها قبل الحرب، ولا تتضمن أي أسرار. ولم تقدم الحرب شيئاً جديداً جوهرياً. ومع ذلك تجدر الإشارة إلى أن مسألتي مفاعل اليورانيوم والبلوتونيوم الناشئ عنه قد تم حلهما خلال الحرب، ولو أن أساس الحل لم يكن أيضاً جديداً. لقد نُفذا عملياً. والتطور الأساسي يتعلق بفصل اليورانيوم 235 من الخليط الطبيعي للنظائر. وبعد الحصول على الكمية المطلوبة من اليورانيوم 235 لن تكون هناك صعوبة نظرية في سبيل القنبلة. ويتم فصل اليورانيوم 235 بطريقة الانتشار، وهي معروفة جيداً، وأيضاً بطريقة التحليل الطيفي للكتلة. لم تُستخدم أي طريقة جديدة. ويرجع النجاح الأمريكي إلى التنفيذ العملي لتصميمات معلومة جيداً وعلى نطاق كبير بدرجة يصعب تصديقها. ويلزم تحذير هنا: عندما كنت في الولايات المتحدة، لم أشارك في التطوير التقاني للمشروع، وبالتالي فليس لي دراية بملامح تصميمه أو بحجم الأجهزة أو حتى بأي جزء منها..

تعليق المؤلفين: إذا كانت هذه هي فعلاً إجابة بور، فإنه يكون قد لجأ إلى عجرفة المفكرين، وهو أمر لم يُعهد فيه، ليتجنب الإجابة الواقعية. يمكن أن تعزل طرقُ الفصل التي ذكرها كميات صغيرة للغاية من نظائر بعينها، وليس كيلوغرامات. وكان الاعتقاد السائد (لا سيما عند بور) أن هذه المشكلة تمثل عقبة في طريق صنع القنابل النووية يصعب تجاوزها. وكان يجب ابتداع أفكار لفصل النظائر على نطاق ضخم. كانت إجابة بور غير كاشفة وتماثل في ذلك إجابة نيوتن، بافتراض أنه سئل عن كيفية إرسال شخص إلى القمر بأن «كل ما يلزم موجود في (البرنسيبيا) Principia فيما عدا بعض التفاصيل التقنية».

ترلتسكي: ما عدد الانشطارات التلقائية في وحدة الزمن لكل من المواد التي سبق ذكرها [يورانيوم 235، يورانيوم 238، بلوتونيوم 239، بلوتونيوم240] ؟

بور: الانشطار التلقائي غير مهم ويجب إهماله في الحسابات. إن عمر الانشطار التلقائي هو نحو 7000 عام. ويتعذر عليّ إعطاؤك تقديراً أكثر دقة، وبسبب هذه القيمة لعمر الانشطار التلقائي، فلا يُنتظر أن يؤثر بفعالية في العملية.

تعليق المؤلفين: جاء هذا السؤال بعد سلسلة من الأسئلة عن المفاعلات وتلا مباشرة سؤالاً عن عدد النيوترونات التي تتحرر بالانشطار، وهو سؤال يتعلق بكل من المفاعلات والقنابل. وعلى ذلك، فليس واضحاً ما إذا كان السؤال يشير إلى القنابل أو إلى المفاعلات. وإجابة بور صحيحة بالنسبة لتصميم المفاعل، وغير صحيحة بالنسبة لتصميم القنبلة. وكما هو موضح في المقالة، فإن الانشطار التلقائي اعتبار أساسي وحاسم بالنسبة لقنبلة البلوتونيوم، لأنه يستلزم تصميماً جديداً تماماً.

ترلتسكي: ما المواد التي صنعت منها القنابل الذرية؟

بور: لا أعلم بالضبط ما المادة التي استُخدمت في القنابل التي ألقيت على اليابان، ولا أعتقد أن أي عالم أكاديمي سيجيب عن هذا السؤال. العسكريون فقط هم الذين يعرفون الإجابة. ويمكنني القول: إنها صنعت إما من البلوتونيوم أو من اليورانيوم 235.

تعليق المؤلفين: كثير من العلماء الرئيسيين في لوس ألاموس (بيته مثلاً) كانوا على علم بالمواد التي استخدمت. ولكننا لا ندري هل كان بور على علم بها أم لا.

ترلتسكي: هل تُستخدم المادة العالية الكثافة قبل تفجير القنبلة أم بعد صدمة الانفجار؟

بور: ليس هناك حاجة إلى ذلك. الأمر المهم هو أن تتحرك جسيمات اليورانيوم أثناء الانفجار بسرعة تساوي سرعة النيوترونات، وإذا لم يتحقق ذلك ستتداعى القنبلة في تفجير صغير، ولكن، مع الانفجار ولتساوي السرعة، تستمر عملية انشطار اليورانيوم حتى بعد الانفجار.

تعليق المؤلفين: السؤال محرَّف. وقد يكون المفروض هو التساؤل عما إذا كانت الكثافة العالية للمادة القابلة للانشطار ـــ التي تنتج من التفجير الكيميائي الأولي ـــ تعزز التفاعل المتسلسل. وستكون الإجابة في هذه الحالة قيّمة جداً. ونحن لم نتمكن من استيعاب القول المنسوب لبور، كما أن الشيء نفسه لا بد أن يكون صحيحاً أيضاً بالنسبة للسوفييت.

اليورانيوم ـــ وهو أثقل العناصر المعروفة حينذاك. لقد دهش الاثنان عندما وجدا أن أحد نواتج التفاعل الناشئ عن قذف اليورانيوم بالنيوترونات هو عنصر الباريوم الخفيف نسبياً. وعلى الفور فسر (و. فريش) و(ل. مايتنر) (لاجئان من ألمانيا النازية) مشاهدات هان وستراسمان على أنها تشير إلى انقسام نواة اليورانيوم إلى نواتين لهما الحجم نفسه تقريباً. وأطلق فريش ومايتنر اسم (الانشطار) Fission على هذه العملية. وكان رأيهما هذا مبنياً على أن التنافر الكهربائي بين البروتونات الكثيرة الموجودة في النوى الأثقل يجعل هذه النوى تكاد تكون غير مستقرة، وبالتالي فإن أسْر نيوترون إضافي يمكن أن يسبب تفريق النوى. وقد وجدا، بالحساب أيضاً، أن انقسام اليورانيوم إلى جزءين يحرر طاقة أكبر كثيراً جداً من تلك التي تم الحصول عليها في جميع التفاعلات النووية التي سبق إجراؤها.

إمكانية التفاعل المتسلسل:

تبع ذلك نشاط محموم لجماعة الفيزيائيين النوويين الدولية المحدودة العدد. وكان دافعهم الغالب في البداية هو الفضول العلمي، وكانوا جميعاً يعلمون أن النتائج العلمية الجديدة يتم نشرها من دون قيود. ولكن اتضح أن لكشفين تمّا في بداية عام 1939 أهمية رئيسية

بالنسبة للبرامج العسكرية التي بدأت بعد غزو هتلر لبولندا في الشهر 1939/9.

في شتاء العام نفسه أتى بور من كوبنهاغن لزيارة جامعة برنستون. وخلال الزيارة، أكد بور ظنه أن خام اليورانيوم الطبيعي لا يحتوي إلا على جزء ضئيل جداً من النوى المسؤولة عن الانشطار المشاهَد. والكشف الحاسم الآخر، الذي توصلت إليه مجموعتان مستقلتان من العلماء، هو انبعاث نيوترونات متعددة من نواة اليورانيوم خلال عملية الانشطار. وبالتالي، يمكن أن تسبب هذه النيوترونات الثانوية انشطار نوى أخرى بالحث، وتبدأ بذلك تفاعلاً متسلسلاً.

وجد بور، بالاشتراك مع الفيزيائي الأمريكي (ج. هويلر) نظرية مفصلة للانشطار. وقد مكّنت هذه النظرية العالمَيْن من التنبؤ بما إذا كانت نواة عنصر معين ستنشطر أم لا بعد عملية الأسر النيوتروني. واقترحا أيضاً احتمالات انشطار النوى (تلقائياً) Spontaneously، أي من دون أن تصبح أولاً غير مستقرة بوساطة نيوترون مأسور.

أكد بور وهويلر، باستخدام نظريتهما الجديدة، صحة فكرة بور التي تنص على أن جزءاً صغيراً من النوى في اليورانيوم الطبيعي يقبل الانشطار بالحث النيوتروني. وقد برهنا بالتحديد على أن مثل هذه النوى توجد في صورة نادرة تعرف باليورانيوم 235. ومثل أغلب العناصر، يوجد اليورانيوم في صور متعددة تسمى (نظائر) Isotopes، ويختلف الواحد منها عن الآخر فقط في عدد النيوترونات الموجودة في نواته. فمثلاً اليورانيوم 235 الذي يكوّن 0.7 في المئة فقط من خام اليورانيوم الطبيعي تحتوي نواته على 143 نيوتروناً وعلى 92 بروتوناً، والعدد الكتلي 235 هو مجموع عدد النيوترونات والبروتونات. والنظير الأكثر وجوداً، وهو اليورانيوم 238، له 146 نيوتروناً إضافة إلى 92 بروتوناً.

أكدت عدة تجارب صحة ما تنبأ به بور من أن اليورانيوم 235 فقط هو الذي ينشطر بالحث النيوتروني. وكان هذا التأكيد يعني أن التقانات المبنية على انشطار اليورانيوم ستتطلب في الغالب عزل اليورانيوم 235. ولكن التوصل لمثل هذا العزل سيكون بالغ الصعوبة. يتحدد سلوك الذرة في جميع العمليات الكيميائية بالشحنة الكهربائية للنواة، وبالتالي لا يتوقف هذا السلوك على عدد النيوترونات. وعلى ذلك، يتعذر فصل اليورانيوم 235 عن اليورانيوم 238 في الخام بأي عملية كيميائية. ستعتمد عملية الفصل على الفرق الصغير للغاية (واحد في المئة) بين وزني النظيرين. وفي ذلك الوقت، لم تكن هناك أي طريقة معقولة التكاليف معروفة لفصل كميات محسوسة من النظيرين.

ألقت هذه الصعوبة في البداية الشكوك حول إمكانية وجود تطبيقات عملية للانشطار النووي. فظن كثير من الفيزيائيين في جميع الدول الكبرى، التي كانت على وشك محاربة بعضها البعض،





يُظَن أن فيزيائيين من أصدقاء بور هما (ب.ل. كابيتزا) (في الأعلى) و(ل.د. لانداو) (في الأسفل) قد وفرا الوازع لبور للتحدث مع السوفييت. سُجن لانداو ولم يُسمح لكابيتزا بالعودة إلى إنكلترا بعد زيارة لأقاربه. ويبدو بأن بور كان يأمل أن يوفر اللقاء له فرصة لنقل شعوره بتأييد العالمين والقلق عليهما.

إلى أن التفاعل المتسلسل في اليورانيوم يمكن أن يكون له مهمتان مميزتان بالغتا الأهمية وتتعلق كل منهما بالأخرى. إحداهما هي أن التفاعل المتسلسل (الذاتي الاعتماد) Self – Sustaining — الذي يمكن التحكم فيه — سيجعل توليد الطاقة النووية أمراً ممكناً. والأخرى هي أنه إذا تضاعف التفاعل المتسلسل من دون حد فقد ينشأ عنه انفجار هائل. ولكن، لأن الأمل في عزل كمية من اليورانيوم 235 تكفي لصنع قنبلة كان بعيداً، لم يعتقد أحد أن مثل هذا الجهاز يمكن تصنيعه في المستقبل القريب، أو أن يكون له تأثير في نتيجة الحرب.

وعلى الرغم من أن هذا التوقّع كان بعيد الاحتمال، فقد ساد الخوف من أن تصنع ألمانيا — التي كان لها دور مهم للغاية في الفيزياء الحديثة — أسلحة نووية. وأدى هذا الخوف إلى تأييد الفيزيائيين في بريطانيا والولايات المتحدة لاستكشاف الاستخدامات العسكرية المحتملة للانشطار. بدأ البرنامج الأمريكي للأسلحة النووية بداية متواضعة عام 1940، وذلك بتمويل حكومي قدره 6000 دولار قُدّم إلى (إ. فيرمي) وعلماء آخرين كان الكثير منهم لاجئين من أوروبا. وكان فيرمي قد هرب من إيطاليا وذهب إلى جامعة كولومبيا في الشهر 1939/1. ومشروع فيرمي الأول كان الحصول على تفاعل متسلسل ذاتي الاعتماد في اليورانيوم الطبيعي وذلك على الرغم من قلة ما يحويه هذا الخام من اليورانيوم 235

القابل للانشطار. نجحت أخيراً محاولات فيرمي في شيكاغو في الشهر 1942/12.

مسار آخر للقنبلة:

كان الفيزيائيون في ألمانيا وروسيا والولايات المتحدة قد تنبهوا في وقت سابق إلى احتمال وجود طريق آخر لصنع القنبلة الذرية. وتنبؤوا، منفردين وسراً، بأن نظير اليورانيوم 238 ــ الموجود بوفرة في الخام ــ يمكن أن يتحول إلى عنصر جديد عند أسره لنيوترون (سمي هذا العنصر الآن البلوتونيوم) وبأن هذا العنصر الجديد يمر بعملية الانشطار بالحث النيوتروني مثله في ذلك مثل النظير النادر اليورانيوم 235. وبما أن البلوتونيوم هو عنصر بذاته، فمن الممكن فصله عن اليورانيوم الذي أنتج فيه بطرق كيميائية. وبالتالي يتاح تجنب الطريقة المقلقة للفصل، وقد ظهر أن مفاعل اليورانيوم، الذي صممه فيرمي، يصنع البلوتونيوم أيضاً. وقد كان هذا المفاعل النموذج الأولي لمصنع إنتاج البلوتونيوم الذي أنشئ في هانفورد بولاية واشنطن.

إذا عدنا إلى عام 1940، عندما كان الجهد البحثي النووي الأمريكي لايزال مركزاً على إجابة عن سؤال «هل يمكن تشغيل المفاعل النووي؟»، نجد أن البريطانيين كان لهم دور حاسم في إثبات أن الأسلحة النووية قد تكون هدفاً واقعياً. كان فريش و(R. بيرلز)، وهو لاجئ آخر من ألمانيا، يعملان سراً ومن دون دعم حكومي في جامعة برمنكهام بإنكلترا، وقاما في الشهر 3 بحساب أقل كمية من اليورانيوم 235 النقي تؤدي إلى تفاعل تفجيري متسلسل. وقد توصلا إلى نتيجة مذهلة، هي أن هذه الكتلة الحرجة صغيرة جداً وتبلغ عدة كيلوغرامات فقط.

رُفعت مذكرة عن هذه النتيجة التي حصل عليها هذان العالمان وكذلك عن أفكارهما المتفائلة عن فصل النظائر إلى مجلس وزراء ونستون تشرشل. وقرر المجلس المتابعة الجادة للبحث العلمي بهدف تصنيع قنبلة نووية. وقد ساعد القرار البريطاني على إقناع الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت عام 1942 بإقرار مشروع مانهاتن. وقد قام الجهد الأمريكي لتصنيع الأسلحة النووية بعد ذلك بفترة قصيرة بتوظيف الآلاف في مختبر تصميم الأسلحة في لوس ألاموس بولاية نيو مكسيكو، وكذلك في كثير من المواقع العلمية الكبيرة في جميع أنحاء الولايات المتحدة.

كانت سياسة الولايات المتحدة هي عدم صرف النظر عن أي احتمالات، وبالتالي قامت بمتابعة البحث في كل من مساريْ البلوتونيوم واليورانيوم إلى القنبلة. وأول مفهوم للقنبلة نُظر فيه في مختبر لوس ألاموس ــ وهو ما يسمى (تصميم البندقية) Gun Design ــ كان يتضمن إطلاق كتلة دون الحرجة من اليورانيوم 235 في أخرى لتكوين فجائي لكتلة حرجة. كان تصميم القنبلة التي دمرت مدينة هيروشيما اليابانية في 1945/8/6 هو تصميم البندقية، واليورانيوم 235 الذي استخدم فيها كان نقياً تماماً، تقريباً، وتم فصله من الخام بتكلفة باهظة.

ولكن الأسلوب نفسه لا يصلح بالنسبة للبلوتونيوم. وقد وصلت أول عينة من البلوتونيوم إلى لوس ألاموس عام 1944 وجلبت معها مفاجأة كبيرة. فلقد وُجد أن للبلوتونيوم ميلاً شديداً إلى الانشطار تلقائياً. وإذا استخدم أسلوب تصميم البندقية لتجميع الكتلة الحرجة، ستولّد النيوترونات المنبعثة خلال الانشطار التلقائي تفاعلاً متسلسلاً وسينتج من ذلك كمية هائلة من الحرارة. وهذه الحرارة تسبب تعويقاً للجهاز، وبالتالي فإن الانفجار الحادث يكون ضئيلاً.

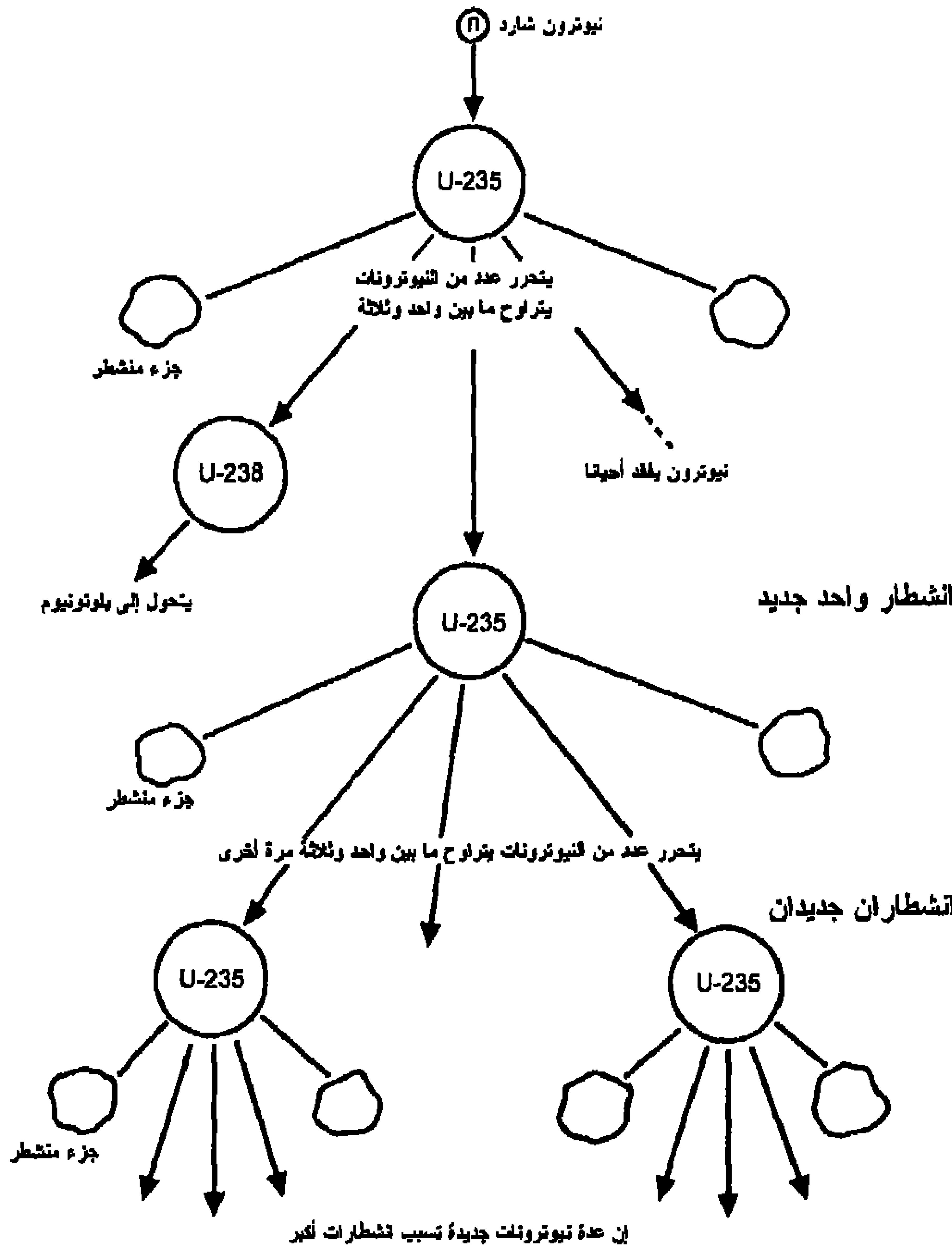
تم ابتكار ترتيب جديد تماماً وأصعب كثيراً هو (تصميم الانفجار الضمني) The Implosion Design. استخدمت كرة حرجة من البلوتونيوم محاطة بمفجرات عادية. يسبب انفجار كيميائي انضغاط البلوتونيوم وبالتالي تزداد كثافته بدرجة كبيرة، وتصبح أعلى كثيراً من قيمتها في الظروف العادية. وبسبب هذه الكثافة العالية، ينمو التفاعل المتسلسل بسرعة كبيرة. وبسبب سرعة الانضغاط، لا يكون هناك وقت يسمح للانشطار التلقائي بتعويق الجهاز. ولقد استُخدم تصميم الانفجار الضمني في القنبلة التي ألقيت على ناكازاكي في 1945/8/9.

أعلنت الحكومة الأمريكية تقريرها الرسمي عن مشروع مانهاتن بعد يومين من إسقاط القنبلة الثانية. وحرر هذا التقرير الفيزيائي (هـ.د. سميث). وقد أفشى التقرير كماً هائلاً من المعلومات، وحقق أيضاً أهدافاً أمنية، لقد عمل الآلاف في المشروع وكان من الضروري تحديد الأمور ذات الصفة السرية من دون لبس. وفي تقديمه للتقرير، كتب الجنرال (ل. كروفز) القائد العسكري لمشروع مانهاتن: «يجب عدم التقدم بطلب للحصول على أي معلومات إضافية».

علماء سوفييت وجواسيس:

وبالطبع، كان السوفييت أيضاً مهتمين بالسلاح النووي خلال الحرب. ويرجع الفضل إلى كتاب (د. هولواي) الجديد (ستالين والقنبلة) Stalin and the Bomb في توضيح التفاعل والتداخل بين العلم، والجاسوسية والسياسة اللذين اتسم بهما هذا الجهد في العالم الغربي.

في ثلاثينيات هذا القرن، كان هناك عدد من التجريبيين الشبان يعملون في معهد الفيزياء التقنية بلينينغراد بقيادة (إ.ف. كورشاتوف)، وقد اكتسب هؤلاء مهارة عالية في البحث النووي، فمثلاً، كان (ك.ن. فلروف)، أحد تلاميذ كورشاتوف، أول من أكد صحة تنبؤ بور وهويلر بأن اليورانيوم ينشطر تلقائياً، وقد وصف هذه النتيجة في الدورية الأمريكية Physical Review في الشهر 1940/7.



وصف، متضمن في تقرير سميث، لتفاعل متسلسل ينطلق من انشطار نواة يورانيوم في مفاعل نووي مصنّع من خام اليورانيوم. وتقرير سميث هو التقرير الحكومي المعلن عن مشروع مانهاتن. وكما هو موضح في الشكل المأخوذ من الوثيقة، يُؤسَرُ نيوترون شارد (في الأعلى) ـ من انشطار نواة يورانيوم 235 غير موضحة في الشكل ـ بنواة يورانيوم 235 أخرى، التي تنشطر إلى جزئين وعدد من النيوترونات. وتؤسَرُ بعض هذه النيوترونات بدورها بنوى يورانيوم 235 أخرى والتي تنشطر هي أيضاً (في الوسط) وتحرّر نيوترونات تولّد بالحث انشطاراً إضافياً (في الأسفل). بدلاً من ذلك، يمكن لليورانيوم 238 إذا امتص نيوترونات أن يتحول إلى بلوتونيوم (في اليسار). عندما أعطي بور تقرير سميث لترلتسكي، كان السوفييت قد انتهوا تقريباً من ترجمته.

كان الفيزيائيون النظريون السوفييت على أعلى مستوى عالمي. وفي معهد الكيمياء الفيزيائية بلينينغراد، أجرى (إ.ب. خاريتون) و(إ.ب. زيلدوفتش) (الذي قاد بالاشتراك مع (أ. ساخاروف) مشروع القنبلة الهيدروجينية بعد الحرب) ودراسات رائدة في موضوع التفاعل المتسلسل للانشطار في اليورانيوم الطبيعي. وفي عام 1941، بعد فرض السرية، قدر خاريتون وزيلدوفتش الكتلة الحرجة لليورانيوم 235 تقديراً صحيحاً، مثلهما مثل فريش وبيرلز اللذين سبقاهما في ذلك. (من الغريب أن الفيزيائيين الألمان لم يقوموا قط بحساب هذه الكتلة أثناء الحرب، على الرغم من أن السمعة المتميزة للعلْم الألماني كانت السبب في إقناع تشرشل وروزفلت بضرورة الحصول على القنبلة مهما كان الثمن).

لقد أوضح الفيزيائيون السوفييت لحكومتهم الإمكانات العسكرية للانشطار. ولكن الاتحاد السوفييتي كان عليه أن يناضل ضد غزو هتلر بعد الشهر 1941/6، ولم يكن في استطاعته توفير الموارد الضخمة لهدف القنبلة النووية، الذي كان تحقيقه غير مؤكد، واستمرت الحال كذلك حتى هزيمة ألمانيا.

ولكن الجاسوسية السوفييتية حققت نجاحاً عظيماً. ففي الشهر 1941/9، حصل الجواسيس السوفييت في لندن على تقرير مرفوع إلى الحكومة البريطانية أساسه مذكرة فريش وبيرلز. وهذه المعلومات، التي يبدو أنها سُرِّبت عن طريق موظف حكومي بريطاني رفيع المستوى، كانت ثمينة للغاية؛ لأنها أوضحت أيضاً أن الحكومة البريطانية قررت التعاون مع الولايات المتحدة في بحوث القنبلة. وبعد ذلك بعدة أشهر، أصبح المصدر الرئيسي لمعلومات السوفييت هو الفيزيائي (ك. فوكس) وهو شيوعي هرب من ألمانيا النازية واستقر في بريطانيا وكان يعمل مع بيرلز. قدّم فوكس متطوعاً سيلاً من التقارير التقنية من بريطانيا وبعد ذلك من الولايات المتحدة عندما كان واحد من أفراد المجموعة البريطانية المشاركة في مشروع مانهاتن. وتضمنت هذه الوثائق وصفاً لفصل النظائر وللمفاعلات النووية. وفي الشهر 1945/6، قدم للسوفييت المواصفات التفصيلية للقنبلة ذات التفجير الضمني والتي استخدمت فيما بعد في ناكازاكي، وبالطبع كان ذلك من أهم الأسرار التي نقلها لهم.

وعلى ذلك، فعندما أرسل الرئيس هاري ترومان قبل أسبوعين من إلقاء القنبلة على هيروشيما إشارته الخفية الشهيرة إلى ستالين «بأن لدينا سلاحاً جديداً له قوة تدمير غير عادية»، كان مخطئاً في ظنه أن ستالين لم يفهم تلميحه. على العكس من ذلك، فقد أمر ستالين فوراً بتعجيل المجهود السوفييتي الخاص بصناعة الأسلحة النووية. كما عيّن ستالين (ل.أ. بيريا) رئيس شرطته السرية ــ المشهور بسمعته السيئة ــ مشرفاً على هذا المشروع.

كان بيريا يبعث الخوف في كل من يقع داخل دائرته. ولم يكن يثق في أحد ــ لا في علمائه ولا في جواسيسه. كان كورشاتوف، الذي ترأس البحث العلمي الخاص بالمشروع منذ بدايته، هو العالِم الوحيد الذي لديه معلومات تفصيلية عن التجسس النووي. ومع ذلك، فقد وظّف بيريا في عام 1945 مجموعة صغيرة من العلماء لتحرير ملفات التجسس التي كان عددها يزداد باستمرار. وكان هذا الفريق يعمل تحت قيادة (إ. ترلتسكي)، وهو فيزيائي شاب مستواه العلمي أقل بكثير من مستوى فريق كورشاتوف، ولكنه واقع تحت سيطرة بيريا تماماً.

زائر من موسكو:

ذهب ترلتسكي إلى كوبنهاغن في الشهر 1945/11 بتوجيه من بيريا ليقابل بور، وكان الأخير قد عاد منذ فترة قصيرة إلى وطنه بعد أن شارك في مشروع مانهاتن. وطبقاً للمذكرة التي رفعها بيريا إلى ستالين، فإن بيريا دبّر هذه المهمة على أمل أن يذكر بور، الذي عُرف عنه تأييده للتعاون الدولي، شيئاً مفيداً عن البحث النووي في الغرب. ومن المؤكد أن بيريا كان يعتقد أن إفشاء بور لأي أسرار، سواء أكانت دولية أم لا، سيساعد السوفييت على التحقق من صحة استخباراتهم وبحوثهم الأخرى، وأيضاً ربما يعرّض بور للابتزاز.

في 11/2، طلب أحد الأعضاء الشيوعيين في البرلمان الدانمركي إلى بور أن يقابل ترلتسكي سراً، وأخبره أن الأخير يحمل معه خطاباً له من صديقه القديم (ب.ل. كابيتزا). وفي الواقع، إن كابيتزا، الفيزيائي التجريبي السوفييتي الفذ على مستوى جيله كله، كان معتقلاً بأمر الحكومة السوفييتية.

وطبقاً لرواية (آكا) ابن بور، وهو فيزيائي عمل أيضاً في لوس ألاموس وفاز بجائزة نوبل ويعمل الآن بجامعة كوبنهاغن، أصيب بور بالدهشة وقال: إن هذا المسلك هو «خطأ مؤسف»، وأصر في رده على عضو البرلمان الدانمركي على وجوب علنية المحادثات وأخبره بأنه لن يناقش إلا المعلومات المتاحة والمعلنة. أخطر بور المسؤولين في الغرب بهذا الأمر، كما أبلغ البريطانيون كروفز بمحاولة الاتصال المشبوهة قبل أن يتم اللقاء، وقد عبّر المسؤولون عن قلقهم لاحتمال وجود محاولة لاختطاف بور.

وعلى الرغم من ذلك، فقد عقد اجتماع يوم 1945/11/14 ووفرت الحكومة الدانمركية الحماية لبور. كلف إرنست ابن بور، وكان عمره حينذاك 21 عاماً، بأن يكون موجوداً في الغرفة المجاورة وتم تسليحه بمسدس معد للإطلاق. وكانت السلطات الغربية توّاقة بالطبع لمعرفة الأسئلة التي سيطرحها موظف المخابرات السوفييتية. وتوضّح التقارير التي رُفعت عنها صفة السرية حديثاً أن بور كان على اتصال بالسفارة البريطانية خلال الأسابيع التي سبقت اللقاء. وتوضح برقية أرسلت إلى موظف كبير في وزارة الخارجية البريطانية أن بور قام بزيارة للسفارة استغرقت وقتاً طويلاً في اليوم نفسه الذي التقى فيه مع ترلتسكي.

ثمة روايتان مستقلتان لشاهدي عيان عن محادثات بور وترلتسكي، وتتفق هاتان الروايتان اتفاقاً جيداً للغاية. ظهرت مذكرات ترلتسكي في روسيا بعد فترة قصيرة من وفاته عام 1993. والرواية الثانية هي لآكا بور وكان عمره حينذاك 23 عاماً، وقد ظل في غرفة الاجتماع طوال اللقاء كله. وذلك بناء على إصرار والده، وهو يتذكر بوضوح كيف سارت الأمور.

كان الاتصال بين الطرفين رديئاً، قام بمهمة الترجمة خبير سوفييتي في الشؤون الدولية ولم يكن جيد الاطلاع على الفيزياء. من المعروف عن بور، كما يمكن لاثنين من المؤلفين (بيته وكوتفريد) أن يؤكدوا أنه كان يخفض من صوته الهادئ عندما يريد تأكيد نقطة حاسمة، وكان من الصعب فهمه عندئذ سواء كان يتحدث بالإنكليزية أو بالألمانية، حتى ولو كان المستمع على علم جيد بموضوع الحديث، وهو أمر لم يكن متوافراً لترلتسكي. وقد أقر ترلتسكي في مذكراته بأنه لم يفهم من حديث بور إلا القشور وأن المذكرات لم تكن تُحرّر إلا بعد أن يحاول هو والمترجم إعادة بناء المحادثة في وقت لاحق.

وطبقاً لكل من الروايتين، استغرق بور أغلب وقت اللقاء في حديث مطول عن كابيتزا و(ل.د. لاندوا). كان كابيتزا قد عمل في كامبردج مع (إ. رذرفورد) عام 1934 عندما منعه ستالين من العودة بعد زيارة لأقاربه في الاتحاد السوفييتي. أما لانداو، وهو عالم نظري متألق، فقد عمل مرة في معهد بور للفيزياء النظرية بكوبنهاغن، وأمر ستالين بسجنه مدة عام قبل الحرب. وقد رأى بور أن يبعث بتأييده لهما إلى رئاسة الحكومة السوفييتية عن طريق مبعوثها ترلتسكي.

يروي ترلتسكي أيضاً أن آكا كان لايزال حاضراً عندما حانت الفرصة له أخيراً لطرح أسئلته، وقد أثار ذلك فزعه. ويؤكد آكا ذلك قائلاً: «بدا ترلتسكي يائساً بعض الشيء. وبعد حديث مستفيض عن كابيتزا .. كان ترلتسكي حريصاً للغاية على طرح عدد من الأسئلة. وجاءت هذه الأسئلة على لسان المترجم بسرعة، ولم نفهم نحن تفاصيل محتواها».

وخلال زيارة ثانية قصيرة في 1945/11/16، سلّم بور تقرير سميث إلى ترلتسكي. وكان قد تم بيع 100000 نسخة من هذا التقرير حتى هذا التاريخ، كما كانت الحكومة السوفييتية قد أوشكت على الانتهاء من ترجمتها الخاصة للتقرير ذاته.

المضبطة:

قدّم بيريا مذكرة عن مهمة ترلتسكي إلى ستالين، وأرفق بها مضبطة حرفية تتضمن الأسئلة التي طرحها ترلتسكي وإجابات بور عنها. سنقوم الآن بتحليل هذه الوثيقة وسنؤجل أمر قبولها كما هي إلى ما بعد.

طرح ترلتسكي 22 سؤالاً، (أعدها فريق كورشاتوف). وكان أكثر من نصف عدد هذه الأسئلة يدور حول المفاعلات النووية وتقنيات فصل النظائر، وكانت هناك أيضاً عدة أسئلة عن الانشطار بالتحديد وعن أجهزة تفجير القنبلة. وكان هناك سؤال عن إمكانية وجود نظام دفاعي ضد القنابل النووية.

وتؤكد المضبطة ما ذكره ترلتسكي من أن «إجابات بور كانت عامة للغاية، وكان في أغلب الأحيان يقول: إن المسؤولين في لوس ألاموس لم يذكروا له التفاصيل .. [وأيضاً] أنه لم يزر قط مختبرات الساحل الشرقي حيث توجد مراكز وتسهيلات فصل النظائر». والواقع، إن إجابات بور المتعلقة بالمفاعلات النووية وتقنيات فصل النظائر لم توفر إلا المعلومات المعروفة من قَبل الحرب، وذلك على الرغم من أن التطورات التي تلت ذلك كانت موضحة بالتفصيل في تقرير سميث (خُصص نصف التقرير تقريباً لهذه الموضوعات). وعندما سُئل بور عن الانشطار بالذات، كان يرجع إلى ما تم نشره قبل اندلاع الحرب وعلى الخصوص إلى مقالته الشهيرة التي اشترك (هويلر) معه في كتابتها.

ومع ذلك، فمن المعتقد أن بور أعطى إجابة غير صحيحة عندما قال: إن الماء الثقيل لم يُستخدم (كمهدئ) Moderator في مفاعل أمريكي لإبطاء النيوترونات. والواقع، إن الماء الثقيل استُخدم في المفاعل الموجود في مختبر أركون بالقرب من شيكاغو، وقد ذُكر ذلك في تقرير سميث. وليس معلوماً ما إذا كان هذا الخطأ البسيط يرجع إلى بور أو إلى ترلتسكي.

تستحق أسئلة ترلتسكي عن تصميم القنبلة تفحُصاً دقيقاً. عندما سُئل بور عن عدد النيوترونات التي تنبعث من النظائر المختلفة لليورانيوم وللبلوتونيوم، أجاب ببساطة «أكثر من اثنين». وعندئذ سأل ترلتسكي: «هل يمكنك إعطاء عدد أكثر دقة؟» وكان رد بور «لا، لا أستطيع.. العدد المضبوط ليست له أهمية..» وفي الحقيقة، إن مقدار اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم اللازم للقنبلة يعتمد بشكل دقيق تماماً على عدد النيوترونات لكل انشطار.



انفجار نووي نتج خلال التجارب التي أجرتها الولايات المتحدة في الشهر 1946/6، أجرى الاتحاد السوفييتي أول تجربة للأسلحة النووية في الشهر 1949/8.

يبدو أن السؤال الثاني الخاص بتصميم القنبلة كان يتعلق بالانشطار التلقائي، وهو كما رأينا أمر يجب دراسته عند تصميم قنبلة البلوتونيوم. ومع ذلك، فليس واضحاً ما إذا كان سؤال ترلتسكي يشير إلى تصميم القنبلة أو إلى تصميم المفاعل لأن الانشطار التلقائي لا أهمية له في هذه الحالة. وكان السؤال الأخير عن الكيفية التي يتطور بها التفاعل المتسلسل بعد أن يؤدي التفجير الكيميائي إلى انضغاط المادة القابلة للانشطار. وكانت إجابة بور نموذجاً للإجابة المبهمة التي لا ترتبط مباشرة بالسؤال.

لم يكن بور في وضع يسمح له بإعطاء إجابات مفصلة عن الأسئلة التي تتضمن فصل النظائر أو تصميم المفاعلات، لأنه لم يشارك في بحوث هذين الموضوعين خلال عمله في مشروع مانهاتن. ومع ذلك، فخلال الفترة التي قضاها في لوس ألاموس، أحاطه (ر. فينمان) بالمعلومات عن التفاعلات المتسلسلة في القنابل وشارك في اختراع التصميم التفجيري. إن الإجابة عن هذه الأسئلة كانت ستوفر فرصة سانحة لبور لو أنه كان يرغب في توصيل معلومات أساسية. وبدلاً من ذلك كانت إجابات بور للسوفييت إما جزئية وإما غير قابلة للاستيعاب، وبالتالي لم يفشِ أي أسرار.

وفي إجابته عن احتمال إيجاد نظام دفاعي ضد القنبلة، أسهب بور حول الحاجة إلى الرقابة الدولية، وهو موقف استمر في تبنيه علانية، ولكن إجابته المتضمنة في المضبطة احتوت على العبارة السخيفة وغير المعقولة: «لقد تقاعد أوبنهايمر العظيم احتجاجاً وتوقف عن العمل في المشروع». وعلى الرغم من أن (ج.ر. أوبنهايمر) قد ترك فعلاً لوس الاموس وعاد إلى جامعة كاليفورنيا في بيركلي، فإنه أصبح بعد ذلك أشد مستشاري حكومة ترومان تأثيراً في مجال السياسة التي تُتّبع بالنسبة للأسلحة النووية.

وفضلاً عن الشك الذي يجب أن تُعامل به أي وثيقة تحمل توقيع بيريا، فإن العبارة المنسوبة لبور عن أوبنهايمر تقنعنا بأن إجابات بور قد تم إجراء (رتوش «تعديلات» طفيفة) لها قبل وصولها إلى مكتب ستالين. والواقع، إن ترلتسكي يروي أن ضابط الشرطة السرية المسؤول عن مهمة كوبنهاغن كان يدربه على الأسلوب الأفضل لإعادة تحرير ما يسمعه. وعلى الرغم من هذه الجهود، فقد خاب أمل بيريا من النتائج، «وأصبح عاجزاً عن التحكم في حديثه» وكان يقاطع ترلتسكي عند تقديمه لتقريره عن محادثاته مع بور «بألفاظ نابية عن بور وعن الأمريكيين». ومع ذلك، زعم بيريا في مذكرته لستالين أن مهمة ترلتسكي كانت ناجحة — وذلك ليس غريباً؛ لأن بيريا هو الذي فكر في هذه المهمة وخطط لها. ومن المثير للاهتمام أن المذكرة لم تتضمن أي شيء يخص تقرير سميث. وكما يبدو، لم تتم مقارنتها بهذا التقرير للتحقق من مضمونها. ومن المحتمل أن بيريا وبطانته ظنوا أن وثيقة تحتوي على هذا الكم الضخم من المعلومات لابد وأن تكون نموذجاً رائعاً للمعلومات المزيفة. وبالتالي يتعذر إهمال ما ادعاه ترلتسكي من أن بور، بتقديمه تقرير سميث، أعطى مصداقية للوثيقة لم تكن لتحصل عليها لو لم يتم ذلك.

بصرف النظر عن مدى التغيير الذي أجراه ترلتسكي وغيره من أعوان بيريا في كلام بور، فإن المذكرة المرفوعة لستالين تقدم أوثق رواية متاحة عن المقابلة. والهدف من أي تعديلات تكون قد أجريت عليها هو المبالغة في أهمية المعلومات المقدمة من بور. ولكن المضبطة لم تتضمن أي أقوال لبور عن المسائل المهمة تقنياً أو عسكرياً غير تلك التي تضمنها تقرير سميث. وعلى ذلك فالادعاء بأن بور أشرك السوفييت في الأسرار النووية هو ادعاء يُكذّبه تقرير بيريا نفسه عن لقاء مبعوثه ببور.

المؤلفون

Hons A. Bethe – Kurt. Gottfried – Roald. Z Sagdeev.

يجمعهم اهتمام مشترك منذ فترة طويلة بالمضامين السياسية للأسلحة النووية. كان بيته، الذي يعمل الآن أستاذاً شرفياً في جامعة كورنيل، رئيساً لقطاع الفيزياء النظرية في مختبر لوس الاموس خلال الحرب العالمية الثانية. وقد فاز عام 1967 بجائزة نوبل لبحوثه في الفيزياء الفلكية. وفي الفترة الأخيرة أجرى بحوثاً في موضوع انفجار المستعمرات العظمى Supernova. أما كوتفريد فيعمل أستاذ للفيزياء في كورنيل، وهو متخصص في الفيزياء النووية والجسيمات الأولية، وشغل رئاسة القسم. كما أنه أحد الأعضاء المؤسسين لاتحاد العلماء المهتمين (بأمور المجتمع). أما ساكديف فيشغل وظيفة أستاذ للفيزياء ومدير مركز الشرق والغرب لبحوث الفضاء في جامعة ميريلاند، وقبل مجيئه للولايات المتحدة كان يعمل مديراً للمعهد السوفييتي لبحوث الفضاء، كما كان المستشار العلمي للرئيس السابق ميخائيل غورباتشوف.

مراجع للاستزادة

THE MAKING OF THE ATOMIC BOMB, Richard Rhodes. Simon & Schuster, 1986.

ATOMIC ENERGY FOR MILITARY PURPOSES: THE OFFICIAL REPORT ON THE DEVELOPMENT OF THE ATOMIC BOMB UNDER THE AUSPICES OF THE UNTTED STATES GOVERNMENT, 1940-1945. Henry D.Smyth. Reissued by Stanford University Press, 1989.

SPECIAL TASkS: THE MEMOIRS OF AN UNWANTED WITNESS: A SOVIET SPY-MASTER. Pavel and Anatoli Sudoplatov, with Jerrold L. and Leona P. Schecter. Little, Brown and Company, 1994.

STALIN AND THE BOMB. David Holloway. Yale University Press, 1994.

WERE THE ATOMIC SCIENTISTS SPIES ? Thomas Powers in New York Review of Books, Vol. 41, No. 11, Pages 10-17; June 9, 1994.



ماذا قال هيزنبرك لبور عن القنبلة ؟

في عام 1941 التقى هيزنبرك مع بور في كوبنهاغن، وبعد مرور عامين، تقريباً، عرض بور في لوس ألاموس رسماً تخطيطيا لما كان يُعتقد أنه تصميم هيزنبرك لسلاح نووي.

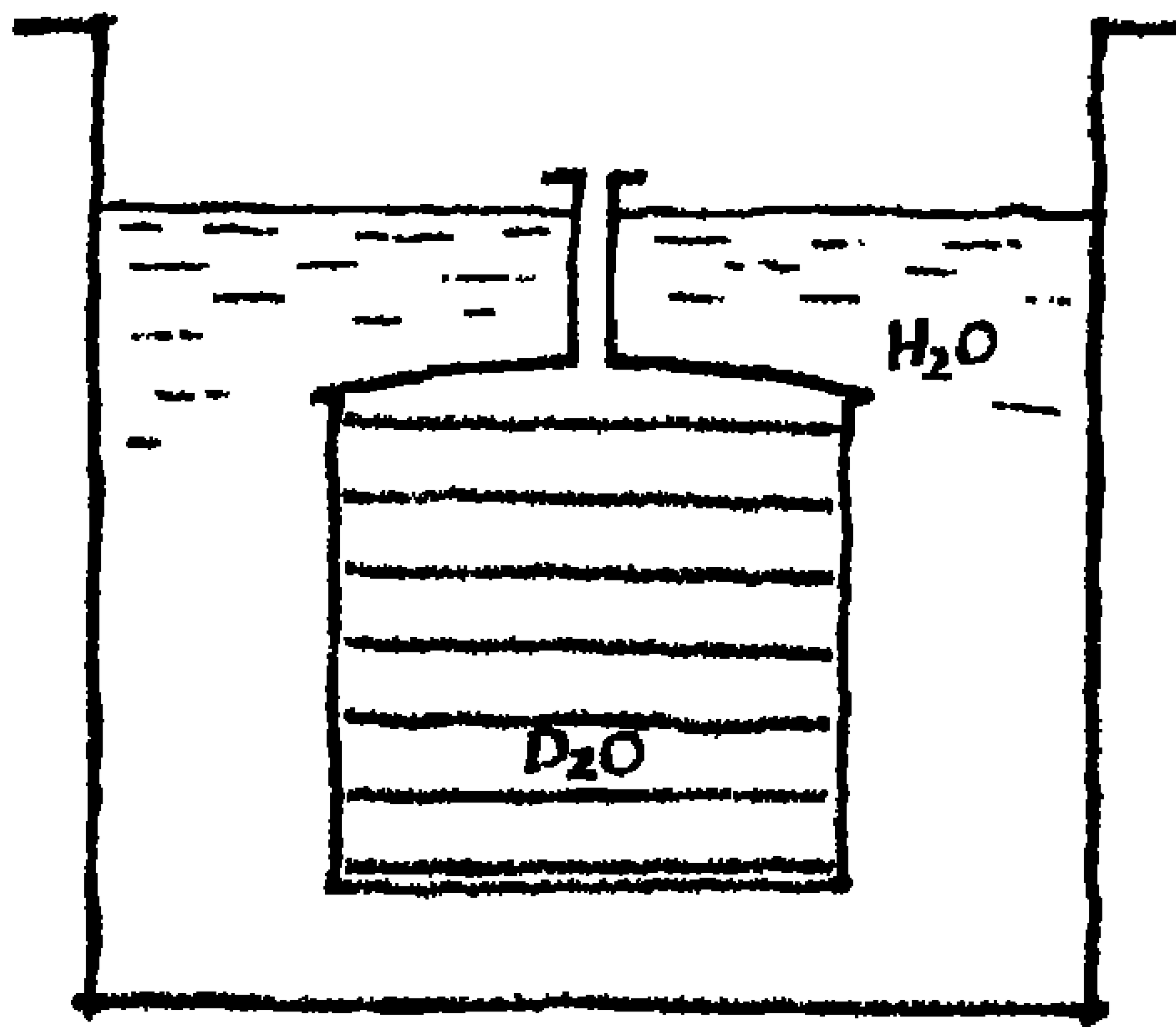
(ج. بيرنشتاين)

علِم (ن. بور) في الشهر 1943/9 أن الكستابو في كوبنهاغن ينوي اعتقاله. وفي التاسع والعشرين من الشهر نفسه، تسلل بور وزوجته وغيرهما ـ ممن كانوا يأملون في الهرب من الدانمرك ـ ببطء وحذر في الظلام الدامس نحو شاطئ يقع خارج كارلسبرك. ومن هناك استقلوا قارباً وعبروا سراً إلى السويد. وفي 1943/10/6 قام البريطانيون بنقل بور، فقط، بالطائرة من السويد إلى اسكتلندا. وفي وقت لاحق من اليوم نفسه، سافر بور إلى لندن والتقى مساء مع السير (ج. أندرسن) عالم الكيمياء الفيزيائية والمسؤول عن المشروع الوليد للقنبلة الذرية البريطانية. قام أندرسن بإطلاع الفيزيائي الدانمركي على البرنامج الأنكلو ـ أمريكي. وطبقاً لرواية ابن بور (آكا) ـ الذي لحق بوالده إلى إنكلترا بعد أسبوع، والذي كان مساعداً له طوال فترة الحرب ـ فإن بور اندهش كثيراً، أو بالأحرى، صُدم بمدى تقدم المشروع الأنكلو ـ أمريكي.

وترجع دهشة بور في الغالب إلى سببين. أحدهما أنه كرر في مناسبات عديدة في الثلاثينيات من هذا القرن ـ عندما كانت الفيزياء النووية في مرحلة التطور ـ اعتقاده أن أي استخدام عملي للطاقة النووية هو في حكم المستحيل. وقد دُعمت وجهة النظر هذه في ربيع 1939 عندما تحقق من أحد التفاصيل المهمة المتعلقة بانشطار اليورانيوم. كان عالما الكيمياء الفيزيائية الألمانية (و. هان) و(ف. ستراسمان) قد اكتشفا في الشهر 1938/12 أن اليورانيوم يمكن أن ينشطر إذا قُذف بالنيوترونات. «كانت (ل. مايتنر) مساعدة هان السابقة وابن شقيقها (و. فريش) قد خمّنا أن نواة اليورانيوم قد انشطرت فعلاً خلال التجارب، وبالتالي أطلقا على العملية اسم انشطار Fission». وقد استخدم في هذه التجارب اليورانيوم الطبيعي، الذي يكوّنُ نظير اليورانيوم 238 نحو 99 في المئة منه. ويشكل نظير اليورانيوم 235 ـ الذي تحتوي نواته على عدد من النيوترونات يقل بثلاثة عن عدد النيوترونات في اليورانيوم 238 ـ نحو 0.7 في المئة.

يتعذر التمييز، كيميائياً، بين النظيرين، والأمر الذي تحقق منـه بور هو أنه و بسبب الاختلاف البنيوي بين النظيرين اقتصر





عقد فيرنر هيزنبرك ونيلز بور، اللذان يظهران في الصورة أعلاه المأخوذة عام 1936، اجتماعاً غريباً بعد سبعة أعوام من هذا التاريخ. ويظن البعض أن عالميْ الفيزياء، اللذين كانا ينتميان إلى الطرفين المتنازعين في الحرب العالمية الثانية، بحثا في موضوع الأسلحة النووية. ويقال إن بور، عند وصوله إلى مختبر لوس ألاموس في نهاية عام 1943، كان معه رسم تخطيطي لما كان يُعتقد أنه تصميم هيزنبرك لصنع قنبلة. وإذا كان الأمر كذلك، ففي الغالب إن الرسم المذكور يشبه تصميم المفاعل الموضح في أسفل الصورة.

الانشطار في تجارب هان وستراسمان على النظير النادر الوجود؛ وهو اليورانيوم 235. واستنتج من ذلك أن صنع سلاح نووي يكاد يكون مستحيلاً؛ لأنه سيتطلب مهمة شاقة وعسيرة للغاية، وهي مهمة فصل النظيرين. وقال في محاضرة له في الشهر 1939/12:

«يستحيل بالوسائل التقنية المتاحة حالياً تنقية كمية من النظير النادر لليورانيوم تكفي لإنتاج التفاعل المتسلسل..» يمكن من ذلك فهم السبب في الصدمة التي أصابت بور بعد أربعة أعوام عندما علم أن ما ينوي الحلفاء عمله هو هذا بالذات.

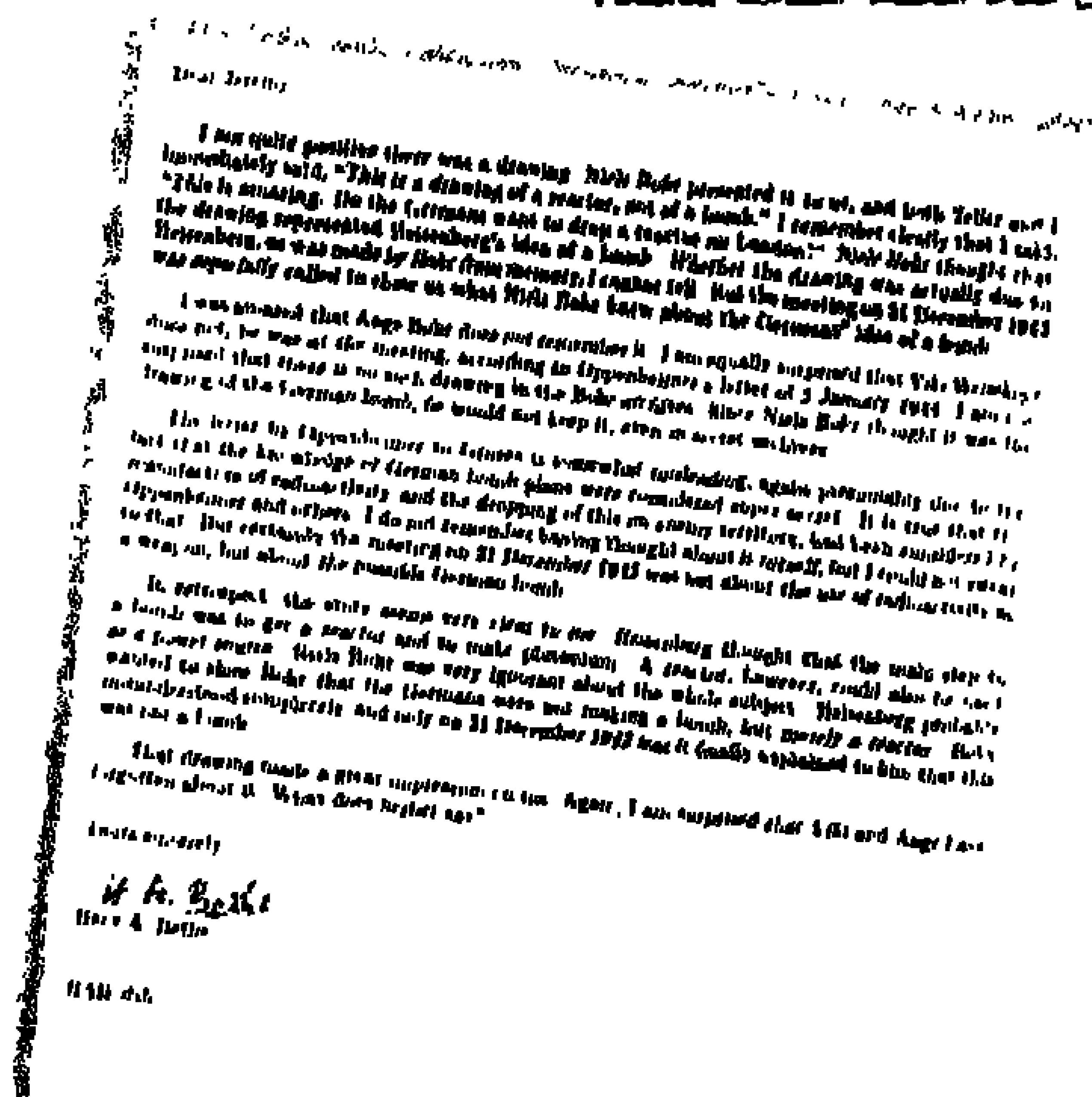
يعود السبب الآخر لدهشة بور إلى اجتماع له مع الفيزيائي الألماني (و. هيزنبرك) في منتصف الشهر 1941/9، أي قبل هربه إلى بريطانيا بعامين تقريباً. كان الألمان في عام 1941 قد احتلوا الدانمرك مدة تزيد على العام. وخلال هذه الفترة، أنشؤوا ما كان يسمى المعهد الثقافي الألماني في كوبنهاغن بهدف نشر الدعاية الثقافية الألمانية. وكان تنظيم اللقاءات العلمية أحد أنشطة المعهد. كان هيزنبرك واحداً من كثير من العلماء الألمان الذين جاؤوا إلى كوبنهاغن تحت رعاية المعهد ليشارك في لقاء مجموعة من علماء الفلك. وقد عرف هيزنبرك بور منذ عام 1922؛ كما قضى مدداً طويلة نسبياً في معهد بور بكوبنهاغن حيث كان بور يؤدي دوراً شبيهاً بالملهم في وضع نظرية الكم. والآن، عاد هيزنبرك ممثلاً لدولة احتلال مزدراة ومُعلناً، طبقاً لبعض الروايات، حتمية انتصارها.

زيارة هيزنبرك:

أمضى هيزنبرك أسبوعاً في كوبنهاغن وقام بزيارة معهد بور في مناسبات عديدة. وخلال إحدى هذه الزيارات، تحدث مع بور على انفراد. ولما كان بور مستمعاً غير جيد، فربما يكون أحدهما قد قاطع كلام الآخر. ومع ذلك، فقد خرج بور من هـذه المناقشة بانطباع واضح هو أن هيزنبرك كان يعمل فـي مجـال الأسـلحة النووية. وقد ذكر آكا بور فيما بعـد: «أثـار هيزنبـرك مسـألة التطبيقات العسكرية للطاقة النووية. وكان والدي متحفظاً وعبر عن شكه في إمكان تصنيع هذه الأسلحة بسبب العقبات التقنيـة الهائلـة التي يجب التغلب عليها، ولكنه حمل انطباعاً بأن هيزنبرك يعتقد أن الإمكانيات الجديدة قد تحدد نتيجة الحرب إذا هي طالـت». والآن، وبعد عامين، أحيط بور علماً لأول مرة ببرنامج الحلفـاء الخـاص بالأسلحة النووية. ومن ثم، كان من الطبيعي أن يسيطر القلق عليه لما قد يكون الألمان قد أنجزوه في هذين العامين.

سيكون من المثير للغاية معرفة المقصود بعبارة «الإمكانيات الجديدة». وفي غياب ذلك، يمكن التوصل إلى تخمين معقول مبني على ما لدينا من معلومات. اتضح للعلماء المنتمين إلى طرفي النزاع في منتصف الأربعينيات أنه يوجد، إضافة إلى أسلوب شطر اليورانيوم، طريق آخر منفصل تماماً لصنع السلاح النووي، هو باستخدام ما عُرِف فيما بعد بالبلوتونيوم. وهذا العنصر أثقل بعض الشيء من اليورانيوم ويختلف عنه كيميائياً، وهو قابل للانشطار كاليورانيوم بسبب بنيته النووية. وخلافاً لليورانيوم، لا يوجد البلوتونيوم في الطبيعة ويجب تصنيعه في مفاعل نووي عن طريق قذف اليورانيوم في قضبان وقود المفاعل بالنيوترونات، ويمكن فصل البلوتونيوم بعد ذلك بالطرق الكيميائية عن اليورانيوم.

وحال فهم هذه العملية يمكن اعتبار كل مفاعل بشكل ما أحد مكونات السلاح النووي، ومن المؤكد أن هيزنبرك كان يعلم هذه الحقيقة جيداً عندما زار بور. بل إنه ألقى محاضرات على مسؤولين ألمان ذوي مناصب رفيعة شرح فيها هذه الإمكانية، وقد تم حفظ نصوص هذه المحاضرات. هل كان هذا هو ما يحاول إبلاغه لبور؟ وإذا كان الأمر كذلك فلماذا؟ من المحتمل ألا نعرف الإجابة المؤكدة عن هذه الأسئلة؟ لأن روايتي الرجلين بالنسبة إلى ما قيل فعلاً اختلفتا اختلافاً شاسعاً.



Dear [illegible]

I am quite positive there was a drawing. Niels Bohr presented it to us, and both Teller and I immediately said, "This is a drawing of a reactor, not of a bomb." I remember clearly that I said, "This is amazing. Do the Germans want to drop a reactor on London?" Niels Bohr thought that the drawing represented Heisenberg's idea of a bomb. Whether the drawing was actually due to Heisenberg, or was made by Bohr from memory, I cannot tell. But the meeting on 31 December 1943 was especially called to show us what Niels Bohr knew about the Germans' idea of a bomb.

I was amazed that Aage Bohr does not remember it. [illegible]

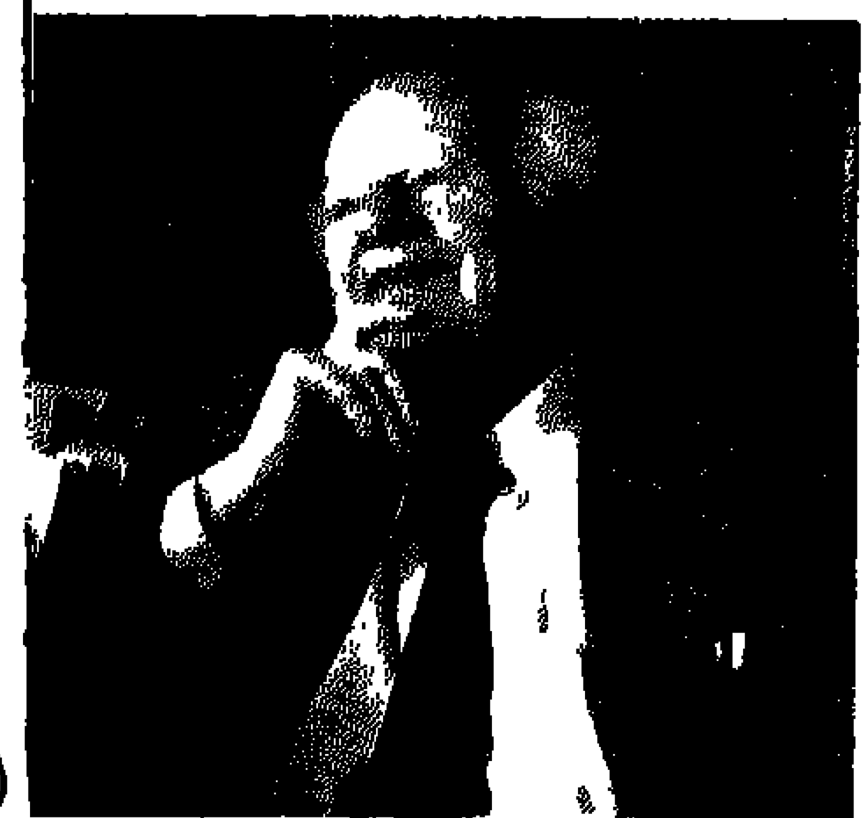
[illegible]

[illegible]

That drawing made a great impression on me. [illegible]

Yours sincerely

H. A. Bethe
Hans A. Bethe



(هـ. بيته) في لوس ألاموس عام 1943 يتذكر بوضـوح رؤيتـه لتصـميم منسـوب لهيزنبرك. وقد كتب للمؤلـف في عام 1994 حـول هـذه المعلومـة (فـي اليسـار).



(في اليمين) يجلس (بيتـه) وخلفه (إ. فيرمي) الذي صمم أول مفاعـــل نـــووي أمكـن تشـغيله بشـيكاغو فـي الولايـات المتحـدة. وقد سـاعد نجـاح فيرمـي على إقناع (بيتـه) بإمكانيـة تصنيع الأسـلحة النوويـة

نشأ عن هذا اللغز الأكبر لغز آخر أقل تعقيداً. فثمة أدلة على أن هيزنبرك أعطى بور مخططاً أثناء اجتماع كوبنهاغن. وليس واضحاً ما إذا كان هيزنبرك قد أعدّ المخطط خلال الاجتماع أم أنه كان معداً من قبل. وبسبب كون أسلوب الاتصال بين علماء الفيزياء النظرية مألوفاً لدي، فإنني أتصور أنه رسم المخطط خلال الاجتماع للمساعدة على إيصال فكرة لبور. وعلى أية حال سأصف بعد قليل هذا المخطط أو صورته التي وصلت إلى مختبر لوس ألاموس في الشهر 1943/12 حيث أثار اهتماماً ملحوظاً، ويبدو أن المخطط قد احتوى على معلومات مباشرة عن الأسلوب الذي كان الألمان يخططون به لصنع الأسلحة النووية. وقبل أن أشرح كيف وصل المخطط إلى لوس ألاموس، سأذكر كيف علمتُ بوجوده، إذ إن هناك علاقة بين الأمرين.

الرسم التخطيطي الغامض:

لقد قمت بإجراء مجموعة من المقابلات مع الفيزيائي (هـ. بيته) وذلك ابتداء من الشهر 1977/11. وقد تمت هذه اللقاءات على فترات خلال عامين، ونتج منها سيرة ذاتية من ثلاثة أجزاء نشرت في مجلة نيويوركر، كما نتج منها كتاب فيما بعد. وقد تابعت في هذه المقالات ــ التي قمت بتسجيلها بالتتابع الزمني ــ حياة بيته. هاجر بيته الذي ولد في ستراسبورك عام 1906 إلى الولايات المتحدة عام 1935، وعمل في جامعة كورنيل منذ ذلك التاريخ، وحصل على الجنسية الأمريكية عام 1941. وكما يتذكر بيته: «كان كل همه عندئذ أن يقوم بعمل ما يُسهم به في المجهود الحربي». وكان في البداية، مثله في ذلك مثل بور، متأكداً من أن صنع الأسلحة النووية غير عملي على الإطلاق، ومن ثم فقد أخذ يُجري بحوثاً عن تطوير الرادار في معهد ماساتشوستس التقاني (MIT).

وفي صيف 1942 شكّل (ج.ر. أوبنهايمر) مجموعة دراسة في جامعة كاليفورنيا ببيركلي للبحث في موضوع الأسلحة النووية. وفي هذه المرحلة، كان المجتمع الفيزيائي قد أقرّ بأن بيته هو أحد كبار علماء الفيزياء النظرية في العالم. وبالتالي كان من الطبيعي أن يدعوه أوبنهايمر للمشاركة في الدراسة. استقل بيته القطار إلى كاليفورنيا، وتوقف وهو في الطريق في شيكاغو ليصطحب (إ. تيلر) معه. سنحت الفرصة لبيته وهو في شيكاغو برؤية المفاعل النووي الذي طوّره (إ. فيرمي) وقال: «صرت مقتنعاً تماماً بأن مشروع القنبلة الذرية هو واقع فعلي وأن نجاحه محتمل». وأمضى بيته ذلك الصيف وهو يعمل في نظرية الأسلحة النووية، وسافر في الشهر 1943/4 إلى لوس ألاموس التي افتتحت حينها كمختبر، وصار بيته كما هو متوقع رئيساً لقسم الفيزياء النظرية فيه.

نعود الآن إلى موضوع المخطط. لقد أبحر بور وابنه آكا من كلاسكو إلى نيويورك على متن الباخرة أكويتانيا يوم 1943/11/29، ووصلا إلى هناك يوم 12/6. أعطي بور وابنه الاسمين الكوديين (نيكولاس بيكر) و(جيمس بيكر) على الترتيب، كما زُودا بحراس شخصيين. وفي 1943/12/28 سافر بور إلى لوس ألاموس بعد أن عقد في واشنطن اجتماعات على مستوى رفيع مع عدد من المسؤولين بمن فيهم الجنرال (ل.ر. كروفز) القائد المكلف بمشروع مانهاتن. تقابل بور بعد وصوله مباشرة يوم 1943/12/31 مع مجموعة مختارة من الفيزيائيين. وكان الهدف الأساسي من اللقاء هو أن ينقل بور للحاضرين ما يعرفه عن الجهد الألماني لصنع أسلحة نووية، لا سيما ما وصل إلى علمه عن طريق هيزنبرك.

سأل (أ. بايز) (آكا بور) أحد أبناء بور، إذا كان هيزنبرك قد أعطى والده رسماً عام 1941. كان آكا بور (في الأسفل) يعمل مساعداً لوالده خلال فترة الحرب، وبالتالي كان على علم جيد بنشاطات والده. كتب بايز للمؤلف في صيف عام 1994 خطاباً (إلى اليمين) قال فيه إن آكا بور متأكد تماماً من أن هيزنبرك لم يرسم مخططاً لوالده.

وخلال إحدى مقابلاتي مع بيته، وصف لي هذا اللقاء باختصار وذكر لي الرسم التخطيطي. وهذا هو ما قاله لي (وهو مسجل عندي على شريط): «أعطى هيزنبرك رسماً تخطيطياً لبور. وقد أرسل بور هذا الرسم في وقت لاحق لنا إلى لوس ألاموس. وكان من الواضح أن هذا الرسم هو رسم تخطيطي لمفاعل. وبعد الاطلاع على الرسم، توصلنا إلى نتيجة مفادها أن الألمان فقدوا عقولهم تماماً. هل يرغبون في إلقاء مفاعل على لندن؟» ولم يتحقق العلماء في لوس ألاموس، إلا بعد الحرب، من أن الألمان كانوا يعلمون يقيناً ــ على الأقل من حيث المبدأ ــ أن ما يمكنهم عمله بالمفاعل هو استخدامه لتصنيع البلوتونيوم. ولكن ما أقلق بور هو إمكان استخدام المفاعل كنوع من أنواع الأسلحة.

وعلى حد علمي، لم ينشر أحد شيئاً على الإطلاق عن مثل هذا الرسم التخطيطي إلى أن شرحت أنا هذا الأمر في مجلة نيويوركر. وفي الواقع، إن مقالتي عن بيته تم الرجوع إليها كثيراً واعتُبرت المرجع لهذا الجانب الغريب من العلاقة بين بور وهيزنبرك. وبالتالي فقد وجدت نفسي أكتب ملاحظة للتاريخ. ومع ذلك فقد اهتزّت هذه المرجعية في بداية عام 1994 خلال إحدى زياراتي الدورية لجامعة روكفلر بمدينة نيويورك، حيث أعمل أستاذاً منتدباً. فقد دعاني الأستاذ (أ. بايز) إلى مكتبه، وكان بايز قد كتب السير الذاتية لكل من آينشتين وبور ويعمل أستاذاً شرفياً للفيزياء بالجامعة. وترجع معرفتي ببايز إلى أربعين عاماً مضت، ولكني لم أقابله منذ وقت طويل. وبالتالي، فقد أتاحت زيارتي له أول فرصة ليطلعني على محادثة هاتفية تلقاها قبل لقائي به بعدة أشهر.

جاءت هذه المحادثة من (ث. باورز) الذي كان يؤلف في ذلك الوقت كتاباً بعنوان حرب هيزنبرك. كان باورز قد علم عن الرسم التخطيطي من الكتاب الذي كتبته عن بيته. وقد أدهشته حقيقة ما بدأ لأول وهلة من أن هيزنبرك أعطى بور رسماً تخطيطياً لمشروع حربي ألماني وسري للغاية أثناء اشتعال الحرب وإذا كان هذا هو ما حدث فعلاً من هيزنبرك فإنه يكون أمراً غير مألوف أبداً. لذا أراد باورز أن يحقق في هذا الأمر. وبالتالي، فقد اتصل بآكا بور في كوبنهاغن (كان والده قد توفي في عام 1962). تضمن الخطاب الذي كتبه آكا بور في 1989/11/16 العبارة: «من المؤكد أن هيزنبرك لم يرسم مخططاً لمفاعل خلال زيارته عام 1941. كما أن تشغيل المفاعل لم يُبحث على الإطلاق».

أصاب ذلك باورز بالذهول وبادر إلى الاتصال ببيته الذي أعاد عليه بالضبط ما سبق أن ذكره لي منذ عشرة أعوام. ولشعوره بالورطة، اتصل باورز ببايز، والآن جاء دور بايز ليوجه السؤال إليّ. وكان بايز قد قام ببحثه الخاص. فقد تحدث مع آكا بور الذي أصر ثانية على أن مثل هذا الرسم لم يكن موجوداً قط في أي وقت. قام بايز أيضاً بمراجعة المحفوظات (الأرشيف) في كوبنهاغن حيث حُفظت جميع الأوراق والدوريات التي تخص بور، وقد أخبرني بأنه لم يعثر على أي إشارة إلى هذا الرسم. والآن جاء دوري أنا لأصاب بالذهول. فالفرق شاسع بين أن يأتي ذكرك في حاشية على حاشية للتاريخ، وبين أن يأتي في حاشية على حاشية لتاريخ مغلوط.

وعدتُ بايز بأن أبحث المسألة شخصياً، على الرغم من حقيقة أنني عند ترك مكتبه لم تكن لدي أي فكرة عن كيفية تحقيق ذلك. فمن الواضح أن إعادة الاتصال «ببيته» لن تفيد كثيراً، إذ لن يوجد ما يمكن أن يضيفه على ما أخبرني به بطريقة مباشرة، وهو الشيء نفسه الذي أعاد ذكره لباورز. وبالتالي سيلزمني لأداء هذه المهمة شهود غير «بيته» وآكا بور. كان هذا أمراً واضحاً، ولكن مَن؟ لقد توفي كل من أوبنهايمر وبور وكروفز. مَنْ يمكن أن يكون قد رأى الرسم التخطيطي غير هؤلاء؟

البحــث:

في الواقع، لقد بدأت البحث بمعلومات أقل بكثير من تلك التي قدمتها للقارئ حتى الآن. كل ما قاله بيته لي هو أن بور قام «بتوصيل» رسم لوس ألاموس، ولم يذكر أي تفاصيل محددة عن الاجتماع الذي تم في 1943/12/31 وعلاقته بهذا الأمر، وبالتالي لم يكن لدي في البداية أي فكرة عمّن حضر هذا الاجتماع ولا حتى التاريخ الذي عُقد فيه. وقد علمت كل ذلك فيما بعد. ولكن أعرف فيزيائيين من العاملين في لوس ألاموس في ذلك الوقت، والذين يمكن أن يكونوا قد رأوا الرسم أو سمعوا شيئاً عنه. وقد فكرت في اثنين، أحدهما (ف. فايسكوف) وهو صديق قديم لي ومقرب من أوبنهايمر.

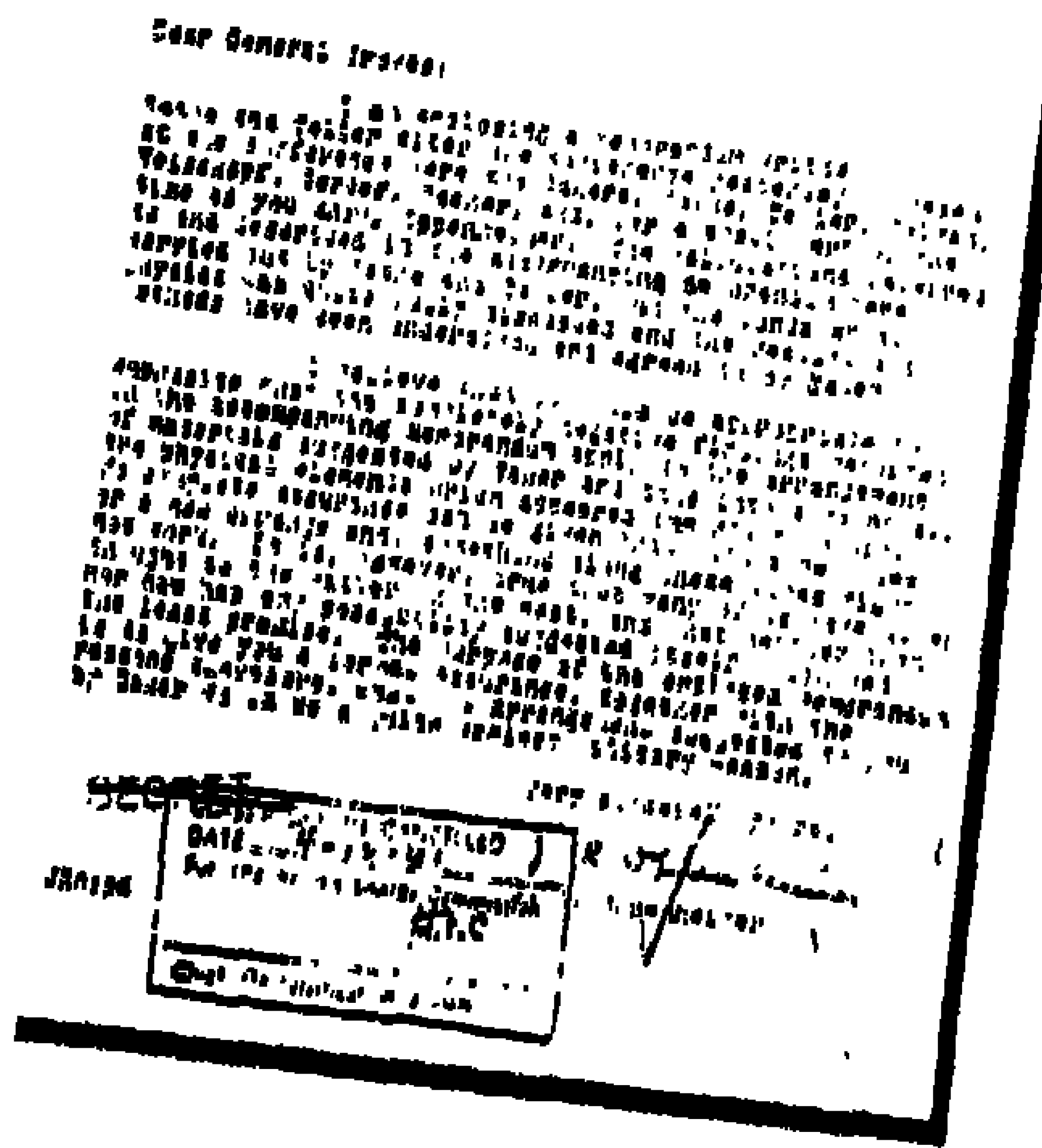
والآخر هو (ب. بيرلز). كان بيرلز وفريش قد أجريا في الشهر 1940/3 أول حسابات دقيقة ــ نظرياً ــ لتحديد كمية اليورانيوم 235، أو الكتلة الحرجة، اللازمة لصنع قنبلة (كانت حقيقة أن هذه الكتلة هي أرطال بدلاً من كونها أطناناً هي التي شجعت الحلفاء على القيام بمشروعهم). عمل بيرلز وفريش في لوس ألاموس منذ الشهور الأولى لعام 1944. وكنت أيضاً أعرف بيرلز منذ سنوات عديدة وقد ناقشته عدة مرات في تاريخ الأسلحة النووية. وكان طبيعياً بالتالي أن أكاتبه أيضاً. وقد نفذت ذلك في الأيام الأولى من الشهر 1994/2، ووصلني الرد سريعاً من كلا الرجلين.

أجاب بيرلز بأنه لم ير قط «الرسم التخطيطي الشهير»، وبأنه لا يعتقد أن أيّاً من «بيته» أو آكا بور قد كذب عن قصد. واقترح كتفسير، احتمال أن يكون بور قد أخفى معلومات الوثيقة الحساسة عن عائلته، أو ربما يكون هيزنبرك قد سمح لبور برؤية الرسم التخطيطي فقط وأن يكون بور قد قام بإعادة رسمه. واقترح بيرلز أن أتصل ببيته وأسأله عن هذا الاحتمال. وكتب فايسكوف مقترحاً أيضاً أن أعاود الاتصال ببيته، لأنه هو الآخر لم ير الرسم التخطيطي ولم يسمع عنه مطلقاً.





إضافة إلى تذكر (ر. سربر) رؤية رسم تخطيطي يوم 1943/12/31، كان لديه وثائق كاشفة عديدة، وقد أرسل للمؤلف خطاباً (في الأسفل) أرسله (ج.ر. أوبنهايمر) إلى الجنرال (ل. كروفز) (يظهر الاثنان معاً في الصورة الموجودة في اليسار). وفي هذا الخطاب أكد أوبنهايمر لكروفز أن «ترتيب المواد» الذي وصفه بيكر (الاسم الكودي لبور) لا يمكن استخدامه كسلاح.



Dear General Groves:

SECRET

ولم يكن أي من هذين الردين هو ما أملت أن أحصل عليه. وبالطبع كان عليّ أن أكتب لبيته وأخبره بما وصل إلى علمي، ولأسأله عن إمكانية إضافة أي معلومات جديدة قد تؤدي إلى التوضيح. ولكني ألهمت فكرة عندئذ، هي الاتصال بـ (ر. سربر)، وهو أستاذ شرف للفيزياء في جامعة كولومبيا ويعيش في مدينة نيويورك، وهو أيضاً صديق قديم. كان سربر قد حصل على الدكتوراه من جامعة ويسكونسن عام 1934 وبعدها فاز بإحدى الزمالات الخمس التي يمنحها مجلس البحوث الوطني في الفيزياء، واختار أن يعمل مع أوبنهايمر ببيركلي، وأصبح قريباً جداً منه في السنوات القليلة التالية.

قضى سربر الفترة من 1938 إلى 1942 في جامعة إلينوي وعاد بعد ذلك ثانية إلى بيركلي ليعمل مع أوبنهايمر في موضوع القنبلة. وكان هناك في صيف 1942 عندما وصل بيته وتيلّر. وبحلول الشهر 1943/3، كان سربر وأول مجموعة من العلماء قد انتقلوا إلى لوس الاموس. وكانت إحدى المهام الأولى التي كُلف بها هي إلقاء مجموعة من المحاضرات التمهيدية عن فيزياء القنبلة على العلماء القادمين. وقد تم جمع هذه الدروس بعد ذلك فيما عرف باسم (كتاب لوس ألاموس الأول) The Los Alamos Primer، وقد رُفع الحظر عنه في عام 1965 ونُشر كاملاً لأول مرة عام 1992. وبما أن سربر كان على اتصال مستمر مع أوبنهايمر خلال هذه الفترة، فإنه سيكون أول من يعرف عن الرسم التخطيطي إن وُجد.

اتصلت بسربر، وعلى الفور تيقنت أني عثرت على منجم من الذهب! فضلاً عن تذكره الواضح للرسم التخطيطي، فإنه تذكر أيضاً وبالضبط ظروف رؤيته له. لقد دُعي للذهاب إلى مكتب أوبنهايمر يوم 1943/12/31 حيث وجد اجتماعاً منعقداً. أظهر له أوبنهايمر رسماً تخطيطياً من دون شرح وطلب إليه أن يتعرّف ماهيته. وكان أوبنهايمر يحب لعب مثل هذا النوع من المباريات الذهنية . نظر سربر إلى الرسم التخطيطي وقال : من الواضح أنه رسم لمفاعل. وأجاب أوبنهايمر بأنه فعلاً رسم تخطيطي لمفاعل هيزنبرك وأن بور قدمه للمجموعة التي كانت تحضر اللقاء. وكما يتذكر سربر، لم يعترض بور — الذي كان يقف مباشرة بجانب أوبنهايمر — على هذا الكلام.

هذا هو ما أخبرني به سربر، ولكنه أضاف أيضاً: إن لديه بعض الوثائق المكتوبة التي تتعلق بهذا الموضوع. وبعد بضعة أيام، وصلتني صور لوثيقتين: خطاب كتبه أوبنهايمر للجنرال كروفز أرسل في اليوم التالي للاجتماع ومذكرة من صفحتين كتبها بيته وتيلّر عن الاحتمالات التفجيرية للمفاعل. وعلى الرغم من أن هذه الوثائق كانت موحية للغاية فإنها — للأسف — لم تحسم القضية تماماً، على الأقل عند رؤيتي لها أول مرة. احتوت مذكرة بيته وتيلّر على مفاتيح ذات مغزى، وسأعود إليها فيما بعد. لم يُشر خطاب أوبنهايمر إلى الرسم التخطيطي أو إلى هيزنبرك أو إلى الألمان، ولكن الجملة الأخيرة منه فيها تضمين واضح عن أن بور تحدث مع كروفز في واشنطن حول هذه الأمور، وربما يوجد في محفوظات كروفز نفسه ما يلقي الضوء على ذلك.

وفي هذه الأثناء، كتبت أخيراً إلى «بيته»، وتسلمت رده في 1994/3/2. بدأ بيته رده بالعبارة: «كان هناك رسم تخطيطي، وأنا متأكد تماماً من ذلك. لقد قدم بور هذا الرسم لنا، وقلت فوراً مع تيلّر: «هذا رسم تخطيطي لمفاعل وليس لقنبلة».. ويتعذر عليّ الجزم بما إذا كان الرسم يرجع فعلاً لهيزنبرك أم أن بور قام برسمه من الذاكرة. ولكن السبب الرئيسي في عقد اجتماع 1943/12/31 هو أن يشرح لنا نيلز بور ما يعرفه عن فكرة القنبلة عند الألمان».

أعطى بيته نظرية لشرح هذا اللغز «كان هيزنبرك يظن أن الخطوة الرئيسية نحو القنبلة هي الحصول على مفاعل واصطناع

البلوتونيوم. ولكن المفاعل يمكن استخدامه أيضاً كمصدر للطاقة. وكان نيلز بور يجهل الموضوع كله تماماً. ومن المحتمل أن هيزنبرك أراد أن يوضح لبور أن الألمان لا يصنعون قنبلة وإنما مجرد مفاعل. وقد أساء بور الفهم تماماً وظل على الحال نفسها حتى اجتماع 1943/12/31؛ عندما وضّح له أخيراً أن ذلك ليس قنبلة. كان للرسم التخطيطي تأثير شديد فيّ. وأكرر دهشتي لنسيان فيكي (فايسكوف) وآكا لهذا الأمر. ماذا يقول سربر؟».

تمكنت من الكتابة إلى بيته وأخبرته بما قاله سربر. كتبت أيضاً إلى تيلّر وسألته عن ذكرياته عن الاجتماع. ولم أكن واثقاً من الحصول على رد، والواقع، إن مثل هذا الرد لم يصل قط. وقد كتبت مرة ثانية إلى فايسكوف وأرفقت بخطابي نسخاً من المذكرات التي أرسلها لي سربر. وفي 1994/2/23 أرسل لي فايسكوف رداً كريماً كعادته، أقر فيه بأنه قد رأى الرسم فعلاً ولكنه كان قد نسي أمره بعد ذلك.

لقد ظننت أن لدي الآن مادة تكفي لكي أعيد الكتابة لبايز، فأرسلت له محتوى شريط بيته الذي كان محفوظاً لدي، وكذلك نسخاً من جميع الوثائق. وكان هو عندئذ على وشك العودة إلى كوبنهاغن حيث يقضي عادة نحو نصف العام مع زوجته الدانمركية. وقد وعدني بأن ينتهز فرصة مواتية ويتحدث مع آكا بور. وقد تم ذلك فعلاً في نهاية الشهر 1994/6. كتب لي بايز في 1994/6/30 وأخبرني بما حدث. لقد تقابل مع آكا بور وتناقشا في محتوى الخطابات وراجعا تسجيلات الشرائط. وبعد كل ذلك ظل آكا بور متأكداً من أن هيزنبرك لم يعط والده قط مثل هذا الرسم. وبالتالي، فقد كتبتُ إلى آكا بور مباشرة. وفي الشهر 1995/2، أرسل لي مساعده (ف. آسرود) رسالة جاء فيها «يؤكد آكا بور الاستحالة التامة لأن يكون بور قد أحضر معه إلى الولايات المتحدة رسماً تخطيطياً يتعلق باجتماعه عام 1941 مع هيزنبرك، كما يؤكد أن المناقشة التي تمت في لوس ألاموس والتي أشرت إليها في خطابك لم تتطرق على الإطلاق إلى لقاء 1941».

والآن، ما الوضع بعد كل هذا؟ سألت نفسي هذا السؤال مراراً منذ تسلمي خطاب بايز في الشهر 1994/6، وأسقط في يدي وظللت حائراً إلى وقت قريب عندما أعدت قراءة المذكرة التي أعدها بيته وتيلّر لأوبنهايمر وبور والتي اطلع عليها كروفز بعد ذلك، وفجأة، أدركت أن الجملة الأولى من الفقرة الثانية من هذا التقرير تحمل بصمة هيزنبرك واضحة وضوح الشمس. تقول الجملة: «المفاعل المقترح يتركب من رقائق اليورانيوم المغمورة في الماء الثقيل». وبعبارة أخرى، لم يكن بيته وتيلّر يبحثان تصميماً قديماً للمفاعل، وإنما التصميم الخاص للغاية، والذي وصفه بور لهما. وهذا التصميم هو في الواقع للمفاعل ذي العيوب الذي اخترعه هيزنبرك في أواخر عام 1939 وبداية عام 1940، والذي ظل متمسكاً به حتى نهاية الحرب تقريباً.

من المستحيل تصور أن يكون بور قد أنتج تصميمه الخاص للمفاعل في فترة الأسابيع القليلة الواقعة بين تاريخَيْ علمه بمشروع الحلفاء ووصوله إلى لوس ألاموس، وأن يكون لهذا التصميم العيوب نفسها المتضمنة في تصميم هيزنبرك. لابد وأن يكون قد حصل على هذه الفكرة من هيزنبرك، إما بالحديث معه وإما من خلال رسم تخطيطي أعده الأخير. ولا يوجد مصدر لتلك الفكرة خلاف هذين الاحتمالين، وإلا فما هو؟

الأدلـــة:

سأقدم هنا بعض الإيضاح. يتطلب أي مفاعل عنصر وقود هو اليورانيوم، محاطاً بما يسمى (مهدئاً) Moderator يعمل على إبطاء سرعة النيوترونات التي تصدم الوقود. إن كفاءة النيوترونات التي تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الصوت في إحداث الانشطار أكبر كثيراً من كفاءة النيوترونات السريعة التي تنتج من الانشطار ذاته. تُغْمَر عناصر الوقود في المهدِّئ، ولكن يجب أن يختار المصمم المادة التي يُصنع منها هذا المهدئ بحرص شديد. ويسري الشرط نفسه أيضاً على كيفية وضع عناصر الوقود في المهدئ. وتستلزم الأخيرة علماً وفناً.

يمكن لليورانيوم أن يمتص النيوترونات من دون حدوث الانشطار، وهذا الامتصاص يصير أشد عند تناقص سرعة النيوترونات. وإذا لم يكن الوضع الهندسي لعناصر الوقود مناسباً، سيمتص اليورانيوم كمية أكبر من النيوترونات ولا يتحقق شرط حدوث التفاعل المتسلسل، وبالتالي لا يتم هذا التفاعل. وفي الواقع، إن أكثر التصميمات كفاءة تتضمن غمر كتل متفرقة من اليورانيوم في شبيكة داخل المهدئ. إن معرفة الحيز الأمثل لهذه الكتل وكيفية ترتيبها تستلزم فناً. لكن أسوأ حل ممكن هو وضع اليورانيوم على هيئة رقائق أو طبقات.

وبالعودة إلى موضوع اهتمامنا، نلاحظ أن بيته وتيلّر كتبا: «يتركب المفاعل المقترح من رقائق اليورانيوم». وسبب اختيار هيزنبرك لمثل هذا التصميم هو أن الحسابات المطلوبة له أسهل من تلك المطلوبة للتصميمات الأخرى. وهناك أيضاً موضوع المهدئ. ذكر بيته وتيلّر أن الرقائق «ستُغمر في الماء الثقيل». ويحمل هذا النص بمجرد شرحه جميع معالم فكرة هيزنبرك. وكما ذكرتُ سابقاً ـــ فإن وظيفة المهدئ هي إبطاء النيوترونات الناتجة من الانشطار. وأفضل المواد لتحقيق ذلك هي المواد الخفيفة، لأن تصادم نيوترون وعنصر لـــه كتلة مماثلة ينتج منه نقص في الطاقة. أما إذا تصادم نيوترون مع عنصر أثقل منه فإنه سيرتد ويغير اتجاهه وليس سرعته.

إذا كانت الكتلة هي العامل الوحيد الذي يلزم أخذه في الاعتبار، فإن الهيدروجين يكون المهدئ المثالي؛ لأن نواته تحتوي على نيوترون واحد، وبالتالي فإن كتلتها تساوي كتلة النيوترون تقريباً. لكن الواقع هو أن الهيدروجين العادي لا يصلح كمهدئ لأنه

يمتص النيوترونات. وعلى العكس من ذلك، فإن (الهيدروجين الثقيل)، الذي تحتوي نواته على نيوترون إضافي، لا يمتص النيوترونات. و(الهيدروجين الثقيل) موجود في (الماء الثقيل). ولكن هذا (الماء الثقيل) نادر الوجود. وعلى سبيل المثال، فإن نسبة وجوده في ماء البحر هي 5000:1، ولاستخدامه كمهدئ يجب فصله عن الماء العادي، وهي عملية صعبة ومكلفة.

ومن ناحية أخرى، فالكربون متوافر ورخيص ولكنه أقل كفاءة كمهدئ. ومع حلول نهاية عام 1940، كان هيزنبرك قد خلص إلى وجوب الاقتصار على الكربون والهيدروجين الثقيل كمهدئين. ولكن في عام 1941، بدأ (و. بوته)، الذي كان عالم الفيزياء النووية الرئيسي المتبقي في ألمانيا، العمل بالكرافيت، وهو الكربون المستخدم في أقلام الكتابة، وأظهرت تجاربه أن الكرافيت يمتص النيوترونات بدرجة عالية تسمح باستخدامه كمهدئ. والشيء الذي لم يدركه بوته هو أن الكرافيت لن يكون نقياً، وسيحتوي على عنصر البورون — إلا إذا تمت تنقيته بدرجة أعلى بكثير مما تتطلبه أي عملية صناعية عادية. والبورون يتشبع بالنيوترونات مثلما يتشبع الإسفنج بالماء. وإذا احتوى الكرافيت على بورون بنسبة 500000:1 يصير غير صالح كمهدئ. وبسبب تجربة بوته، قرر هيزنبرك وغيره من الفيزيائيين الألمان أن الماء الثقيل هو الاختيار العملي الوحيد.

يذكر أن الفيزيائيين الذين أشرفوا على البرنامج الناجح للمفاعل هنا (أي في الولايات المتحدة) قد أجروا النوع نفسه من الحسابات، وأنهم توصلوا إلى قناعة هيزنبرك نفسها بأن مفاعل الكربون سيحتاج إلى كمية من اليورانيوم الطبيعي أكبر من تلك التي تلزم لمفاعل الماء الثقيل. وقد أجرى فيرمي وزميله (ل. زيلارد) أيضاً تجارب على امتصاص الكربون للنيوترونات. وكان زيلارد متعصباً لنقاء الكرافيت، وبالتالي — وعلى خلاف ما حدث مع بوته — نجح الكرافيت كمهدئ في تجاربهما. وقد قررا أن الكربون أفضل مهدئ لأن تكلفته أقل بكثير من تكلفة الماء الثقيل. احتوى مفاعل فيرمي الذي شُغّل أول مرة يوم 1942/12/2 على شبيكة من كتل اليورانيوم مدفونة في الكربون، وقد استُخدم الماء الثقيل كمهدئ في جميع المفاعلات التجريبية الألمانية، والتي لم يُشغّل أي منها.

لننظر ثانية إلى الجملة «المفاعل المقترح يتكون من رقائق اليورانيوم المغمورة في الماء الثقيل» في وثيقة بيته وتيلّر. هذه العبارة تكاد تطابق، بالنسبة لتصميم المفاعل، عبارة «صنع في ألمانيا» مكتوبة عليه.

يبدو من كل هذا، من دون شك، أن هيزنبرك حاول وصف جهاز نووي لبور. كما يبدو أيضاً أن هذا الجهاز هو ما كان هيزنبرك يتصوره عن المفاعل. وسواء أعطى هيزنبرك لبور رسماً تخطيطياً أم لا، فمن الواضح أن بور احتفظ في ذاكرته بصورة التصميم. ولكن بور لم يكن يفهم في ذلك الحين الفرق بين المفاعل والقنبلة، وأعتقد أن هيزنبرك كان يصف قنبلة.

وعلى ذلك، فربما يكون آكا بور على حق عند قوله: «إن والده لم يشارك في أي مناقشة عن المفاعل». كما يمكن أن يكون على حق أيضاً في اعتقاده أن هيزنبرك لم يعط بور أي رسم تخطيطي، إذ لم يكن أي من الذين اتصلت بهم متأكداً من أن الرسم الذي رآه كان في يد هيزنبرك — ولكن الأمر الذي أكدوه جميعاً هو أنه كان رسماً لمفاعل هيزنبرك. أعتقد أن هذا يحل اللغز، ولكنه لا يكشف السر. ماذا كان الهدف الرئيسي لزيارة هيزنبرك؟ المعجبون بهيزنبرك يقولون: إنه أراد أن يوضح لبور أن الألمان يعملون على تصميم مفاعل للأغراض «السلمية» فقط.

ثمة أمر آخر جدير بالملاحظة، هو أن هيزنبرك — عندما زار بور — كان يعلم جيداً إمكان استخدام المفاعلات في تصنيع البلوتونيوم، وأن البلوتونيوم يمكن أن يوفر الوقود لسلاح نووي. لماذا إذاً زار بور؟ ما الرسالة التي كان يرغب في إيصالها؟ ما الأمر الذي كان يريد إقناع بور بعمله أو بعدم عمله؟ ما الذي كان يحاول معرفته؟ هذا هو السر الحقيقي وهو سر قد لا يُكشف أبداً.

المؤلف

Jeremy Bernstein

يعمل أستاذاً للفيزياء في معهد ستيفنـــز للتقانة وأستاذاً منتدباً في جامعة روكفلر، كما يشغل منصب نائب رئيس مجلس الأمناء لمركز آسبن الفيزيائي. نشر بيرنشتين 50 بحثاً متخصصاً و12 كتاباً وعدداً كبيراً من المقالات في المجلات غير المتخصصة. وقد كان محرراً في مجلة نيويوركر، كما درّس الكتابة التي لا تعتمد على الخيال Nonfiction Writing في جامعة برنستون. وفاز بجوائز عديدة مخصصة للكتابة العلمية. وهو زميل للجمعية الفيزيائية الأمريكية ولفرقة بنيامين فرانكلين للجمعية الملكية للفنون.

مراجع للاستزادة

HANS BETHE: PROPHET OF ENERGY. Jeremy Bernstein. Basic Books. 1980.

NILES BOHR'S TIMES: IN PHESICS, PHELOSOPHY AND POLITY. Abraham pais. Oxford University Press, 1991.

THE LOS ALAMOS PRIMER: THE FIRST LECTURES ON HOW TO BUILD AN ATOMIC BOMB. ROBERT Serber. Edited by Richard Rhodes. University of California Press, 1992.

HEISENBERG'S WAR: THE SECRET HISTORY OF THE GERMAN BOMB. Thomas Powers. Alfred A. Knopf, 1993.



لمحة عن الحياة العلمية للعالم: موري كيل مان
أوديسيوس[1] فيزياء الجسيمات

ينبغي ألا يدهشنا أن لدى موري كيل مان، عالم الفيزياء النظرية البارع، تفسيراً لمدى اهتماماته المذهل. ففي حين نجد أن معظم الناس ينقسمون إما إلى «أبولوبيين[2]» أي متجردين وتحليليين، أو «ديونيسوسيين[2]» أي متأثرين ونزّاعين إلى الحدس، فإن كيل مان يجمع الخصيصتين. ويقول كيل مان: «بعض الناس يسمي مثل ذلك الشخص أوديسيوسيا»، ويلفظ كيل مان بوضوح كل مقطع من الكلمة الأخيرة، ربما لمساعدتي في تهجئتها. «إنها حالة تجعل المرء في عُزلة».



يشرح موري كيل مان في مكتبه في كالتك، بوصفه هاوياً لعلم الإنسان، طريقة اللعب بلعبة إفريقية ـ غربية تعرف باسم (واري) Wari.

مضى من عمر كيل مان 66 سنة، وهو أستاذ في معهد كاليفورنيا للتقانة، ولكنه مشهور أكثر بوصفه متخصصاً في فيزياء الجسيمات. حاز جائزة نوبل، وهو أحد المهندسين الأساسيين (للنموذج المعياري) Standard Model، ذلك الصرح النظري المُحكم الذي يُفسّر سلوك (الجسيمات دون الذرية) Subatomic Paticles والقوى التي تحكمها. ومن جملة إسهاماته أنه اقترح أن النيوترونات والبروتونات، وهي اللبنات الرئيسية للمادة العادية، مكونة من جسيمات تسمى (كواركات) Quarks أساسية أكثر من النيوترونات والبروتونات.

بيد أن الفيزياء مملكة أصغر من أن تحوي فكر كيل مان الذي لا يهدأ. ويورد «بيانه الشخصي»، الواقع في 17 صفحة، قائمة باهتمامات مثل «التاريخ الطبيعي (وبخاصة دراسة الطيور) وعلم اللغة التاريخي وعلم الآثار القديمة والتحليل النفسي والتفكير الإبداعي». ثم هناك «أمور تتصل بالسياسة الخاصة بجودة البيئة العالمية (يدخل فيها الحفاظ على التنوع البيولوجي) وبكبح النمو السكاني والتنمية الاقتصادية الصالحة لأن تُدعم واستقرار النظام السياسي العالمي (ويشمل ذلك وضع الأسلحة الاستراتيجية)».

ويقر كيل مان بأنه مفرط في توسعه. وفي الواقع، لقد حسب بالضبط مقدار هذا التوسع. فهو يتحسر قائلاً: «إني أضطلع بمقدار يزيد نحو 50 مرة على ما يمكن أن يفعله أي إنسان، وأعمل بكفاءة قريبة من 2 في المئة. لذا فإني أصارع يومياً معاملاً قدره 2500، ويزداد يومياً رجوعي إلى الوراء مدة 8 سنوات. وإن ثمانية وتسعين في المئة من وقتي هو وقت ضائع، مجرد ضائع».

وبطبيعة الحال، ثمة قليل من الوقت للمقابلات فأسبوعاً تجده قائماً بدور المضيف والمتحدث الرئيسي عند الاحتفال بالعيد المئوي لتأسيس (كالتك) Caltech (معهد كاليفورنيا للتقانة). وفي الأسبوع التالي تجده في طريقه إلى أوروبا لحضور ندوة في الفيزياء. ويخصص الأويقات الفائضة لتأليف كتاب عنوانه «الكوارك والنمر الأمريكي» ويدور حول اهتمام حالي رئيسي: هو التفاعل في

(1) Odysseun هو بطل ملحمة الأوديسّة Odyssey للشاعر هوميروس.

(2) نسبة إلى Apollo و Dionysus: الأول إله إغريقي للفنون والطب والضوء، ويمثل في الفن أرفع نموذج للوسامة عند الشباب. أما الثاني، فيمثل في الميثولوجيا الإغريقية إله الخمر. (المحرر)

الطبيعة بين الظواهر البسيطة كالكواركات، والمعقدة كالنمور الأمريكية. ولكن كان في برنامج كيل مان صباحٌ غير مشغول بشيء، وذلك في نهاية رحلة له إلى نيويورك. فاستطعت أن أنضم إليه لتناول الفطور ثم لأودعه في مطار لاكارديا.

بدا لي كيل مان، ذلك الرجل الضئيل ذو الشعر الأبيض المقصوص والنظارة السوداء، أنه بين أهله وذويه وهو يمضغ رغيفاً لامعاً له شكل كعكة مزينة بطبقة من سمك سليمان المُدخّن في مطعم مزدحم في مانهاتن. وهو مثل عدة فيزيائيين بارزين من جيله، ولد في مدينة نيويورك لأبوين من المهاجرين الأوروبيين اليهود ونشأ فيها. أما طريقته في الكلام، فمع أنها نموذج للمعرفة الواسعة ــ ولعدم الانتماء إلى مكان بعينه ــ فإنها مازالت محتفظة بأسلوب أهالي نيويورك الساخر اللاذع.

وربما كانت تلك طريقته في إبداء آرائه. فالكتّاب العلميون والصحفيون عموماً هم «جهولون» و«صنف فظيع». وينزع العلماء البريطانيون إلى «الاهتمام بكونهم أذكياء وغير عاديين أكثر من اهتمامهم بكونهم على صواب». كما أعطى كيل مان تقييمات تنقصها الحماسة لبعض العلماء المرموقين. ثم قال: «لكنني لا أرغب في أن يُنقل عني أنني أشتم الناس، فهذا شيء غير لطيف، وبعض هؤلاء الناس هم أصدقائي».

لنستعرض بسرعة شباب كيل مان: دخل جامعة ييل سنة 1944، عقب إكماله الخامسة عشرة من عمره، وتخرج فيها بعد ذلك بأربع سنوات مع شخص حقق هو الآخر نجاحاً عظيماً، ذلكم هو جورج بوش، ومع أنهما كانا في ييل في جماعتين مختلفتين فقد تعرّف الأول بوشَ بعد ذلك بعشرات السنين أثناء عملهما عضوين في مجلس المعهد السميثسوني. ويقول كيل مان: إن بوش «إنسان لطيف» يقيم «حفلات جيدة جداً. وما أتمناه هو أن يجد له شخص ما عملاً أفضل من إدارة شؤون البلاد».

لقد شعر كيل مان بشيء من الأسى عندما أخفق في الفوز بعرض مقبول مالياً قدمه أحد برامج «عصبة آيفي[3]» للدراسات العليا في الفيزياء. إذ خشي أن يكون معهد ماساتشوستس للتقانة MIT، الذي عرض عليه أن يعمل مساعداً للفيزيائي (ف.ف. فايسكوف)، «مكاناً وضيعاً»، أي محلاً لإنتاج المهندسين بدلاً من العلماء الحقيقيين. ويقول كيل مان: «غير أني ذهبت إلى هناك فوجدت المعهد رائعاً». فقد تبين أن فايسكوف «رجل مدهش وفيزيائي ممتاز». فضلاً عن ذلك، كان كثير من زملائه من خريجي عصبة آيفي، «لذا فإنني لم أكن كالمعزول عن هؤلاء الناس».

وبعد حصول كيل مان على الدكتوراه من المعهد MIT في أوائل سنة 1951 كافح لإيجاد نظام في المجموعة المنوعة المذهلة من (الهدرونات) Hadrons الناشئة في مسرِّعات الجسيمات. والهدرونات جسيمات تخضع للقوة النووية الشديدة التي تشد النيوترونات إلى البروتونات وتمسكها معاً في نوى الذرات. واخترع كيل مان في آخر الأمر خاصية كمومية سماها (الغرابة) Strangeness تنبأت، بدقة، بسلوك الهدرونات الجديدة الغريبة.

أنشأ كيل مان، تأسيساً على هذه النظرة الثاقبة، نظام تصنيف للجسيمات سمّاه (الطريق الثُّماني) Eightfold Way على غرار النهج البوذي إلى الاستنارة. وقد شجع هذا المصطلح الفكرة التي كانت رائجة في الستينيات، وهي أن فيزياء الجسيمات والتصوف الشرقي مترابطان بعمق، ويسمّي كيل مان هذه الفكرة «هراء» وهو يقول: إن تلميحه إلى البوذية (وهي من جملة اهتماماته) كان مجرد «دعابة حملها بعضهم محمل الجد».

ويشير كيل مان إلى أنه كان في وسعه أن يدبر بسهولة «أسماء أعلام طنانة للأشياء تقوم على اللغة الإغريقية وما إليها. فأنا أعرف كيف أفعل ذلك. ولكن تلك الأسماء كانت في الغالب قائمة على أفكار تبيَّن أنها خاطئة، فكلمة (بروتون) مثلاً تعني (الأول)، و(أتوم) Atom تعني (الذي لا يتجزأ). وهذا كله خطأ كما تبين! لذا قَدَّرتُ أنه ربما من الأفضل أن آتي بشيء هازل».

نال كيل مان جائزة نوبل لعام 1969 تقديراً لأعماله على «الغرابة» و«الطريق الثماني». وكان قد صاغ قبل خمس سنوات نظرية أوسع شمولاً بكثير (اقترحها أيضاً بصفة مستقلة أحد طلابه السابقين وهو (ج. زفايك). وهي تقول بأن النيوترونات والبروتونات وجميع الهدرونات الأخرى مكونة من جسيمات أولية أبسط منها تسمى كواركات، تربطها معاً جسيمات حاملة للقوة، مُنحت (وليس المانح كيل مان) اسم (كلوونات) Gluons.

ويتوق كيل مان إلى تبديد اعتقادين خاطئين شائعين حول تاريخ الكواركات. فأولاً هو لم يسرق ببساطة هذا اللفظ الجديد من كتاب جيمس جويس بعنوان (السهر عند جثة فينيكان) Finnegan's Wake، وإنما قرر في البداية أن صوتاً مثل Kwork (يُلفظ على قافية واحدة مثل Fork) قد يكون لقباً لطيفاً للجسيم الجديد. عندئذ فقط، أثناء تمعنه في قراءة كتاب جويس، المُطنب وغير المفهوم غالباً ــ وهو كثيراً ما فعل ذلك منذ صدور الكتاب سنة 1939 ــ وقع على الجملة الآتية: «three quarks for muster mark» وقرر أن يعتمد تهجئة جويس للكلمة.

ثانياً، مسألة إشارة كيل مان في إحدى مقالاته الأولى إلى أن الكواركات هي كيانات «رياضياتية» لا«حقيقية». ويقول في هذا الصدد: إنه دعا إلى هذا التفريق لأنه اعتقد أن الكواركات ستبين بالاختبار أنها على الدوام «حبيسة» Trapped ضمن الهدرونات، ومن ثم سيتعذر عزلها وكشفها بمفردها. «لم أرغب في الدخول في جدل مع الفلاسفة، المزعجين بدرجة لا تصدق، فيقول كثير منهم: (ماذا؟ حقيقة؟ ماذا تعني بقولك حقيقة؟)».

---

(3) Ivy League، مجموعة كليات أمريكية رفيعة المكانة الأكاديمية والاجتماعية. (المحرر)

قدمت التجارب في السبعينيات دليلاً ــ غير مباشر ولكن مازال لايقاوم ــ على نموذج كيل مان الأساسي للكواركات الحبيسة (وعلى نظرية أكثر تفصيلاً، قائمة على الكواركات، استنبطها كيل مان وآخرون، سميت الديناميك اللوني (الكروموديناميك) الكمومي Quantum Chromodynamucs). ويقول كيل مان: «ولكن عملياً الجميع يكررون، في كتب متلاحقة يضعها كتّاب علميون وأناس على شاكلتهم، أني لم أؤمن، حقاً، قط بالكواركات لأني قلت إنها على الأرجح (رياضياتية) ».

وطوال السنوات العشر الأخيرة أو نحوها، كان كيل مان أقل انغماساً في التطورات اليومية لفيزياء الجسيمات. فهو مرشد مشجّع ــ لامطور نشيط ــ (للأوتار الفائقة) Superstrings. وهي جسيمات غاية في الصغر والافتراضية، ينشئ تلوّيها، كما يُفترض، جميع الجسيمات وقوى الطبيعة القابلة للرصد، ومعها (الثقالة) Gravity. ويقول كيل مان إنه يشعر شعوراً أبوياً نحو الأوتار الفائقة، لأن مقالته عن شيء يسمى نظرية (التشتت) Dispersion في الخمسينيات ساعدت على إلهام الباحثين (النموذج الوتري الأول) First String Model.

ولكن كيل مان كان ولا يزال أكثر انغماساً في ابتكار صيغة (للميكانيك الكمومي) Quantum Mechanics يمكن تطبيقها في علم الكون (الكونيات، الكوسمولوجيا). وقد نشأ هذا العمل، جزئياً، على اقتراح قدمه (س.و. هوكنك) (من جامعة كامبردج) و(ج.ب. هارتل) (من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارة) مفاده أن الكون كله يمكن وصفه بمعادلة كمومية أو بدالة (تابع) موجيّة. ولكن ثمة مشكلة: فالدالة الموجية تعين للجسيم سلسلة مسارات محتملة، ولا «يختار» الجسيمُ أحد المسارات إلا عندما يرصده شخص ما. فإذا كان الجسيم هو الكون كله، فمن هو الراصد وأين هو؟

ويشير كيل مان إلى أن (هــ. إفريت III) (من جامعة برنستون) اخترع في أواخر الخمسينيات شكلاً من الميكانيك الكمومي غير مقيد بالراصد يسمى التفسير (المتعدد العوالم) Many Worlds -. وهو ينص على أن الجسيم يتبع جميع المسارات المعينة بدالته الموجية، إنما في عوالم مختلفة، ويقوم كيل مان مع هارتل، تلميذه سابقاً، بتطوير شكل معدل لفكرة إفريت، يسمى التفسير (المتعدد التواريخ) Many – Histories.

ويقول كيل مان إنهما، هو وهارتل، قصدا باختيارهما كلمة «تواريخ» إبعاد نفسيهما عن اعتقاد إفريت «المعيوب»، وهو الاعتقاد بحقيقة العوالم البديلة. ويتذكر كيل مان ملاحظة أحد زملائه وهي: «إن كنت تصدق تفسير إفريت، فينبغي لك أن تقامر برهن ضخم، لأنك في أحد العوالم سوف تربح مالاً كثيراً».

كما صار كيل مان باحثاً متحمساً لدراسة (التعقد) Complexity الذي، كما يقول، يجسد المبادئ التي تشكل فعلياً أساس جميع مشغولياته واهتماماته الأخرى. وقد ساعد في أوائل الثمانينيات على تأسيس معهد سانتافي في نيومكسيكو، حيث يدرس الباحثون «نظماً معقدة مُوائمة» كاللغات والمقدرة العقلية والاقتصاديات القومية. كما حاول وضع بصماته على هذا الحقل المعرفي باقتراحه مصطلحاً جديداً هو Plectics يتصل بدراسة البساطة والتعقد في كل مظاهرهما التي لا عدّ لها. (لم يثبت هذا المصطلح بعد، ربما لأن فيه جذراً إغريقياً).

وصلنا إلى المطار وقد نفذ الوقت ولم نلمس تقريباً شخصية كيل مان السياسية التي تعود إلى حداثته. ففي سنة 1944 دخل جامعة ييل متأخراً فاستطاع العمل متطوعاً في حملة إعادة انتخاب الرئيس روزفلت. وساعد في الستينيات، بوصفه مستشاراً علمياً للبنتاغون، على صياغة السياسة التي أدت بالولايات المتحدة والاتحاد السوفييتي (سابقاً) إلى حظر جميع الصواريخ النووية باستثناء دفعات محدودة جداً لكل من الدولتين. وفي عام 1979، بعد أن صار كيل مان مدير «مؤسسة ماك آرثر الوقفية» بدأ بإنشاء برامج لتشجيع الحفاظ على الموارد الطبيعية، وضبط النمو السكاني، و«الأنشطة المستدامة» في جميع أرجاء العالم.

وسنحت لي الفرصة لأطرح سؤالاً عن علم اللغة التاريخي. فيبوح لي كيل مان: «علم اللغة هو شيء أعرفه حق المعرفة». وفي الواقع، فإنه يعمل محرراً مشاركاً لكتاب في هذا الموضوع كما يكتب له مقدمة وأحد فصوله. وتناقش مقدمة كيل مان باختصار نظرية اقترحها (ج.هــ. كرينبرك) (من جامعة ستانفورد) تقول بأن في وسع المرء إنشاء شجرة العائلة لجميع لغات العالم، وذلك بتحليل التشابهات بينها. ويحاجُّ بعض علماء اللغة المحترفين، في أن دليل كرينبرك اللغوي لا يستطيع تأييد استنتاجاته. ويرى كيل مان هذا الرأي «سخيفاً على ما يظهر بحيث تتساءل: كيف يمكن لأناس راشدين أن يُقرّوه؟».

ولما أبرز كيل مان تذكرة سفره لتسجيلها، أبدى قلقه من أنه قد لا يكون في حوزته من النقود ما يكفي لاستئجار سيارة من مطار كاليفورنيا إلى بيته. فأقرضته 40 دولاراً، وكتب لي شيكاً بها. وأثناء تسليمه إلي، اقترح علي في عدم التفكير في صرفه، إذ قد يكون توقيعه «ذا قيمة إلى حد ما».

ثم اندفع كيل مان بعجلة نحو بوابة المغادرة قائلاً: «أحب أن أكون أول من يركب الطائرة». تبعته من غير تفكير، وأخيراً استجمعت شجاعتي لأقول له بأن بعض العلماء يقرون بأنه بارع جداً، ولكنهم يرون أيضاً أنه من النوع الذي يدعي معرفة شاملة. فرد كيل مان بجلافة «لا أدري ما معنى ذلك». ولكنه بعد بضع ثوان أضاف: «فعلاً إنني أعرف الكثير عن أشياء كثيرة، هذا صحيح!».



روبرت أوبنهايمر: قبل الحرب العالمية الثانية

إن أهم ما يُذكر به أوبنهايمر هو إنجازاته خلال الحرب العالمية الثانية. مع أن له إنجازات مهمة عديدة في الفيزياء النظرية خلال الثلاثينيات.

(ج.س. ركدن)

قبل إحدى وخمسين سنة وبالتحديد في 1945/7/16، ومَضَ ضوء انفجار فوق صحراء نيومكسيكو أنار السماء قبل الفجر. وكان من بين مَن شهد الحدث العديد من فيزيائيي هذا القرن المميزين. وبينما هم يراقبون الضوء المتوهج عبر النظارات المستخدمة عند اللحام الكهربائي، كانت الحقيقة تتجلى أمامهم: لقد بدأ العصر النووي. كان الشاهد الرئيسي هو روبرت أوبنهايمر ـــ وهو الشخص الذي كان مسؤولاً عن إدارة مشروع القنبلة الذرية منذ بدايته.

كان أوبنهايمر شخصاً فريداً. فذكاؤه الحاد واهتماماته المتعددة وبنيته الضعيفة وشخصيته الرقيقة جعلت منه رجلاً ذا صفات خرافية،



أوبنهايمر 1904-1967

صار أوبنهايمر بعد الحرب العالمية الثانية رجلاً مشهوراً معروفاً بقيادته للفيزيائيين الذين شيدوا القنبلة الذرية في مختبرات (مخابر) لوس آلاموس. لقد زوده نجاحه كمدير لمشروع مانهاتن بالقاعدة اللازمة للتأثير، ولبعض الوقت استمتع بما لديه من سلطة وتأثير.

بعد ذلك وفي الشهر 1954/6، زمن حمى المكارثية ووسط الارتياب بالشيوعية، قررت هيئة الطاقة الذرية للولايات المتحدة الأمريكية (AEC) أن لدى أوبنهايمر خللاً في شخصيته واعتبرته خطراً على الأمن القومي. في حين أعلن (أ. آينشتاين) وآخرون ـــ في معهد الدراسات المتقدمة في برنستون والذي كان أوبنهايمر مديره في ذلك الوقت ـــ دعمهم له. كما أعاد مجلس أمناء المعهد في الشهر 10 انتخابه مديراً لفترة أخرى. وقد احتفظ بهذا المنصب حتى سنة قبل وفاته في الشهر 1967/2. وعلى الرغم من ذلك، فإن إجراءات هيئة الطاقة الذرية جعلت أوبنهايمر يبدو رجلاً محطماً.

لقد كتب عدد من المؤرخين عن أوبنهايمر الذي نجح في تنشيط الفيزياء النظرية الأمريكية قبل الحرب بعقد من الزمن والذي لم يكن محظوظاً لسببين؛ أحدهما، أنه صار فيزيائياً في الزمن الصعب عندما بدأت تظهر نظريات الميكانيك الكمومي (الكوانتي) والفيزياء النووية التي غيرت الكثير من الأفكار التقليدية في هذا المجال. والآخر أن أوبنهايمر كان يُصنّف بين قليلي الإنجازات، مع أن له في واقع الأمر إسهامات مهمة في عدة مجالات رئيسية في الفيزياء قبل أن يتولى منصبه في لوس آلاموس.

لقد أرسى أوبنهايمر أسس الدراسات المعاصرة للفيزياء الجزيئية. وكان الأول في تعرّف (ظاهرة المروق «النفق» Tunneling) في الميكانيك الكمومي، التي يستند إليها تصميم مجهر المسح النفقي المستخدم لإظهار البنية السطحية ذرة فذرة. لقد أخفق بمقدار صغير عن التنبؤ بوجود البوزترون وهو الجسيم المضاد للإلكترون، وأثار عدة مسائل عصيبة في نظرية الإلكتروديناميك الكمومي؛ كما طوّر نظرية هطولات الأشعة الكونية، وبرهن على أن النجوم الضخمة يمكن أن تنهار تحت تأثير قوى (التثاقل) Gravitation، وقد تمكن من ذلك قبل فترة طويلة من معرفة أن النجوم النيوترونية والثقوب السوداء هي جزء من الصورة الكونية.

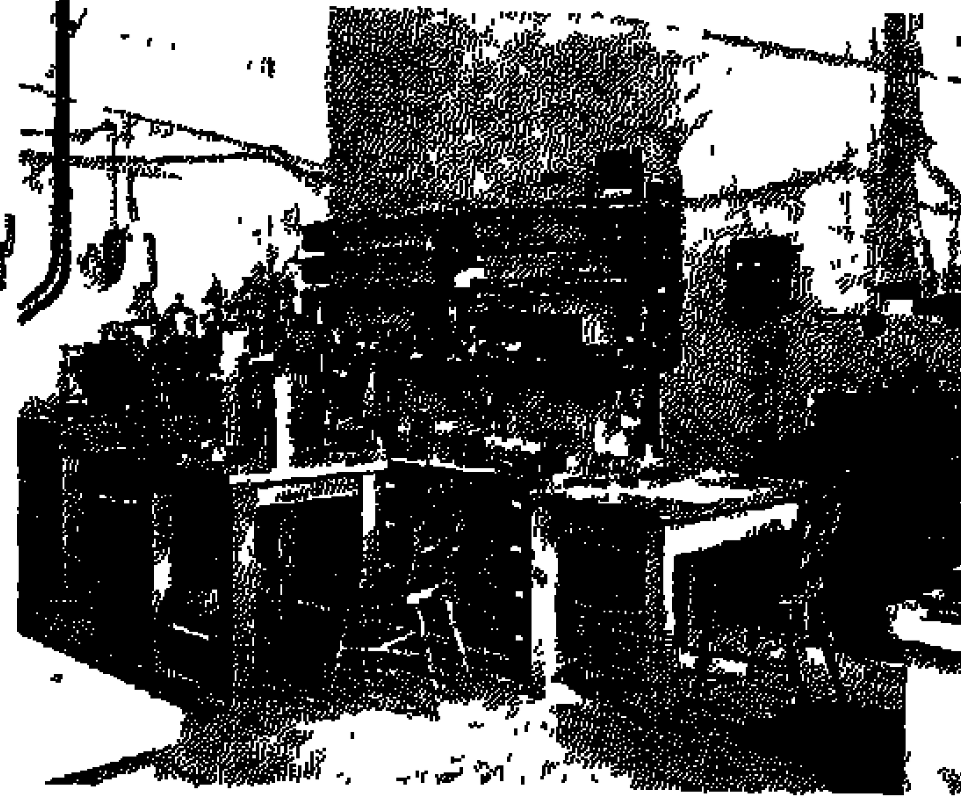
إلى الفيزياء من الكيمياء:

وكالعديد من الفيزيائيين في عصره، درس أوبنهايمر الكيمياء. وقد قال:«مقارنة بالفيزياء فإن الكيمياء تبدأ تماماً من صميم الأشـــياء ». وتبين له عندما كان طالباً في المرحلة الجامعية الأولى





طلب (ب. بريدكمان) (في اليمين) إلى أوبنهايمر، وكان طالباً في المرحلة الجامعية الأولى، أن يعمل معه في مختبره بجامعة هارفارد. في العشرينيات، كان بريدكمان من الرواد في فيزياء الضغوط العالية، وبنى في الحقيقة، أغلب الأجهزة اللازمة لقيامه بدراساته. ومن المرجح أن يكون أسلوبه التجريبي قد أثر في أوبنهايمر ليتخذ قراره بالمضي قدماً في امتهان الفيزياء التجريبية بعد تخرجه عام 1925.



كان مختبر كافنديش في كامبردج ببريطانيا (في اليسار) منزلاً لأوبنهايمر مدة عام بعد تركه هارفارد. كان أمله أن يعمل هناك مع (إ. رذرفورد) (المختبر في اليمين)، لكن رذرفورد وهو أكبر تجريبي في هذا القرن، لم يعجب بأوبنهايمر. وبدلاً من ذلك ساعد أوبنهايمر فيزيائي مشهور آخر في كافنديش هو (ج.ج توماس) (في الأعلى).

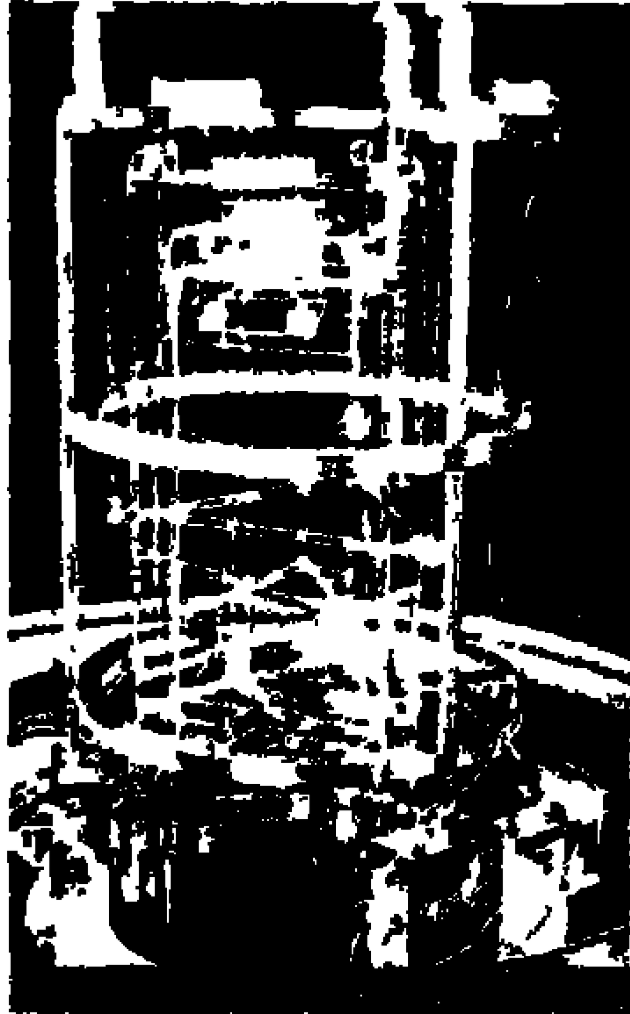
بجامعة هارفارد أن ما يحبه من الكيمياء قريب جداً من الفيزياء. وتقدم في ذلك الحين بلائحة بما قرأه إلى قسم الفيزياء الذي اعتبره على أساسها طالباً خريجاً. تسجل أوبنهايمر في العديد من دورات الفيزياء ولكن بسبب تنوع اهتماماته ومقرراته الدراسية، فإنه ادعى لاحقاً أنه تلقى فقط بشكل سريع وسطحي، ولكن بتلهف، بعض أقسام الفيزياء. وكتب «مع أنني أحببت العمل، فإنني توسعت بسطحية وهذا ما أنهكني، وقد حصلت على المرتبة الأولى في كل هذه المقررات التي لا أعتقد أنني كنت بحاجة إليها».

إن كان ذلك صحيحاً أو لا، فإن أوبنهايمر اكتسب خبرة قيمة من عمله في مختبر (بيرسي و. بريدكمان) وقد مُنح هذا الامتياز بفضل تفوقه. لقد كان التجريبيون يسيطرون على الفيزياء الأمريكية في العشرينيات من مثل بريدكمان الذي كان من أوائل الذين بحثوا في خواص المادة تحت ضغوط عالية وبنوا معظم التجهيزات التي تحتاج إليها أبحاثهم. وهكذا فإن أوبنهايمر ومن خبراته الدراسية لم يكن يفرق بين الفيزياء التجريبية والفيزياء النظرية، وقد كانت الأخيرة نشاطاً أوروبياً إلى حد كبير. لقد قال مرة وهو يتذكر أيام دراسته «لم أكن أعرف أنه يمكن أن تكسب معيشتك بهذه الطريقة (كفيزيائي نظري)».

لهذا السبب ومع اقتراب وقت تخرجه في عام 1925، كان يتطلع إلى العمل في مختبر كافنديش في كامبردج ببريطانيا بإشراف (إ. رذرفورد)، أحد أعظم التجريبيين في هذا القرن. لقد أجرى رذرفورد أول اختبار للتأكد من أن الذرة تحوي قلباً ثقيلاً، ولكن صغير جداً، أو ما يسمى النواة. لم يُعجب رذرفورد بإمكانات أوبنهايمر ورفض طلبه. كتب أوبنهايمر بعد ذلك إلى (ج. تومسون)، التجريبي الآخر المعروف في كافنديش . قَبِل تومســـون أوبنهايمر تلميذاً باحثاً وطلب إليه العمل في زاوية من مختبره، يقوم فيها بترسيب الأغشية الرقيقة على قاعدة من الكولوديون. لقد كتب إلى أحد أصدقائه في المدرسة الثانوية في 1925/11/1 «إنني أمر في مرحلة سيئة. إن عمل المختبر مضجر جداً، وأنا سيئ في أدائه ويستحيل الشعور بأنني أتعلم شيئاً».

كان الشتاء التالي من الأوقات الصعبة على أوبنهايمر، ولكن ظهرت مع قدوم الربيع إمكانيات جديدة. فقد قدّمه رذرفورد، الذي تولى شخصياً العناية بأوبنهايمر، إلى نيلز بور، عندما زار الأخير مختبر كافنديش، عن طريق (ب. بلاكيت)، وهو فيزيائي آخر من كافنديش كان قد قابل (ب. إهرنفست)، من جامعة ليدن. كما أصبح أوبنهايمر صديقاً لاثنين من فيزيائيي كامبردج المؤثرين وهما: (ب. ديراك) و(ر. فاولر). كان كل هؤلاء الرجال نظريين وساعدوا على توسيع آفاق أوبنهايمر في هذا المجال. لقد كان فاولر بشكل خاص حاد الملاحظة، وقد نصح أوبنهايمر أن يتعلم صياغة ديراك الجديدة لميكانيك الكم وأن يطبقها على عصابات الطيف، وهذا مزج بين المعرفة القديمة والجديدة لم يعالجه أحد بعد.

انغمس أوبنهايمر في تلك المسألة وطوّر خلال السنين اللاحقة النظرية الحديثة للطيف المتصل (المستمر). ولم يصل هذا العمل بأوبنهايمر إلى نشر ورقته العلمية الأولى فقط بل أيضاً كانت بداية مستقبله كفيزيائي نظري. عندما زار (م. بورن) كافنديش في صيف عام 1926 واقترح على أوبنهايمر متابعة الدراسات العالية في جامعة كوتنكن، مركز الفيزياء النظرية، وافق أوبنهايمر على هذا الاقتراح مباشرة؛ إذ قال في مقابلة مع الفيلسوف (ت. كوهن) عام 1936 «لقد شعرت بالتحرر الكامل من مسؤولية العودة ثانية إلى المختبر».



صورة أوبنهايمر عام 1928، بعد سنة من حصوله على الدكتوراه من جامعة كوتنكن، حيث كان (م. بورن) و(و. هايزنبرك) و(ب. جوردان) يصيغون نظرية الميكانيك الكمومي. وفي ذلك العام اكتشف أوبنهايمر ظاهرة المروق (النفق) في الميكانيك الكمومي وذلك بالبرهان على أن الحقل الكهربائي الضعيف يمكن أن يزيح إلكترونات من سطح الفلز، وبفعله هذا وصف المبدأ الذي يعتمد عليه مجهر المسح النفقي (في اليسار) قبل 54 عاماً من اختراعه.





صمم (ب. ديراك) (في اليمين) معادلة موجية نسبية لوصف الإلكترون في عام 1928، على الرغم من أن عمله كان دقيقاً في عدة أمور لكنه أثار مسائل محيرة. لقد انتقد أوبنهايمر نظرية ديراك بعمق وفي جدله كاد يتوقع وجود البوزترون.



لقد أدرك أوبنهايمر في كوتنكن للمرة الأولى المشكلات التي تحيّر الفيزيائيين الأوروبيين. وكتب لصديقه (ف. فُركسون) في الشهر 1926/11 «العلم هنا أفضل بكثير». في ذلك الوقت، كان بورن وهايزنبرك وجوردان في كوتنكن يصيغون نظرية ميكانيك الكم. جعل بورن، ذلك الأستاذ المتميز، كوتنكن أفضل مكان لفهم تعقيدات النظرية الجديدة. تعلم أوبنهايمر بسرعة. وأرسل في الشهر 1926/12، بعد أربعة أشهر من تقدمه إلى كوتنكن، مقالة علمية عن «النظرية الكمومية للأطياف المتصلة» إلى مجلة فيزيائية ألمانية متميزة تدعى Zeitschrift Fur Physik. كانت هذه المقالة العلمية في الحقيقة نسخة مختصرة للأعمال التي ستشكل أطروحته للدكتوراه. أمضى أوبنهايمر بعد حصوله على الدكتوراه من كوتنكن في الشهر 1937/3 سنتين، إحداهما في الولايات المتحدة الأمريكية والأخرى في أوروبا كزميل لمجلس البحوث الوطني.

وخلال هذه الفترة، استفاد أوبنهايمر كثيراً من تعاونه مع مشاهير الفيزيائيين الأوروبيين في تلك الأيام، وقال لكوهن «لقد اكتسبت منهم بعض الحس.. وبعض التذوق في الفيزياء»، ومع ذلك فالمسائل النظرية التي عالجها كانت أساساً من اختياره. ولاحقاً، في الثلاثينيات، استطاع أوبنهايمر، وربما بسبب خبرته المختبرية، التعاون مع التجريبيين الذين أقر العديد منهم أنه فهم بياناتهم أكثر منهم.

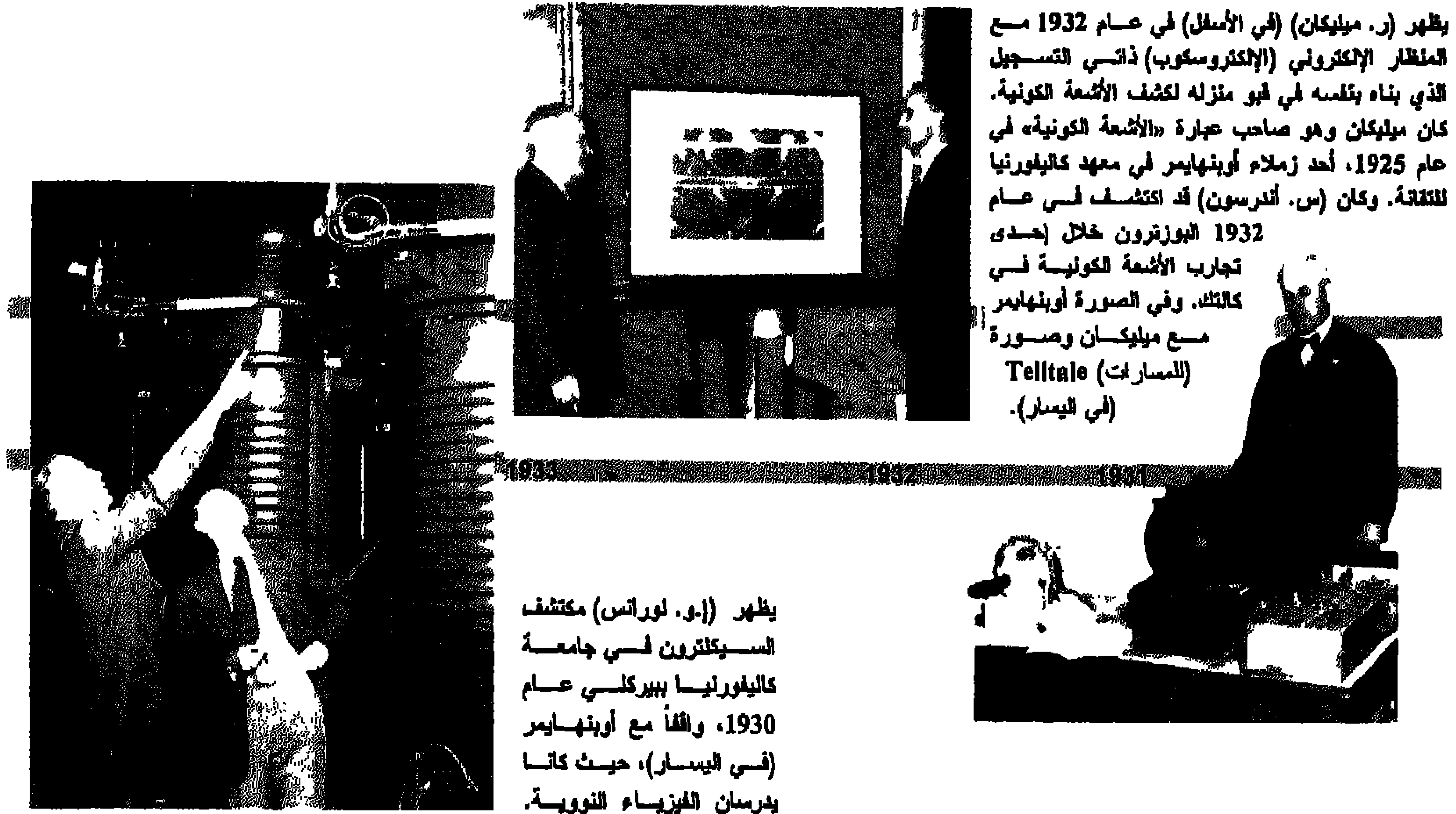
الذرات والجزيئات:

عندما نكتشف أن الذرة تصدر أطيافاً منفصلة خلال الانتقالات ما بين حالات الطاقة فهذا أول مؤشر إلى أن فيزياء القرون السابقة غير دقيقة. لذا فإن الذرات والجزيئات وفرت لأوبنهايمر في عام 1927 المكان الطبيعي لاختبار نظرية الميكانيك الكمومي الجديـــدة.

وكان إسهامه الكبير الأول هو إيجاد طريقة لتبسيط تحليل أطياف الجزيئات. ومن خلال تفسير الأطياف يستطيع الفيزيائيون تحديد بنية الجزيئات وخواصها، ولكن الوصف الدقيق باستخدام ميكانيك الكم معقد حتى بالنسبة إلى جزيء بسيط، لأن الإلكترونات والنواة في الذرة التي تشكل هذا الجزيء يتفاعل بعضها مع بعض.

لاحظ أوبنهايمر أنه بسبب الفروق الكبيرة بين كتل كل من الإلكترونات والنواة، فإنه يمكن، إلى حد كبير، إهمال هذه التفاعلات. إن استجابة الكتلة الكبيرة للنواة بطيء للتفاعلات المتبادلة، إذ يمكن أن تكمل الإلكترونات عدة دورات من حركتها قبل أن تكمل النواة جزءاً من دورتها. وفي إحدى إجازاته كتب أوبنهايمر مقالة علمية قصيرة حول هذا الموضوع وأرسلها إلى (بورن) Born. لقد استغرب بورن من قصر مسودة مقالة أوبنهايمر وخرج بمقالة وصلت إلى 30 صفحة، ذكر فيها بالتفصيل أن اهتزاز النواة ودورانها يمكن معالجتهما منفصلين عن حركة الإلكترونات. وحالياً، يعتبر تقريب بورن ــ أوبنهايمر نقطة البداية للفيزيائيين والكيميائيين العاملين في التحليل الجزيئي. بعد ذلك، حدد أوبنهايمر احتمال قيام ذرة بأسر إلكترون من إلكترونات ذرة أخرى. وتماشياً مع تقريب بورن ــ أوبنهايمر برهن على أن هذا الاحتمال مستقل عن (الكمون بين النووي) Internuclear Potential للذرتين.

وفي الحقيقة، اكتشف أوبنهايمر في عام 1928 سلوكاً آخر في الميكانيك الكمومي يسمى ظاهرة المُروق (النفق). ويحدث المروق تحت ظروف نظرية مختلفة. فالإلكترون مثلاً، يمكن أن يهرب من قيود تعزله عادة إذا ما تصرف مثل كرة بليارد متناهية في الصغر. والمثال المعهود على المروق هو الحالة التي تحدث عندمـــا تقذف النواة جسيم ألفا أثناء التفكيك الإشعاعي . فداخل نواة



يظهر (ر. ميليكان) (في الأسفل) في عام 1932 مع المنظار الإلكتروني (الإلكتروسكوب) ذاتي التسجيل الذي بناه بنفسه في قبو منزله لكشف الأشعة الكونية. كان ميليكان وهو صاحب عبارة «الأشعة الكونية» في عام 1925، أحد زملاء أوبنهايمر في معهد كاليفورنيا للتقانة. وكان (س. أندرسون) قد اكتشف في عام 1932 البوزترون خلال إحدى تجارب الأشعة الكونية في كالتك. وفي الصورة أوبنهايمر مع ميليكان وصورة (للمسارات) Telltale (في اليسار).

يظهر (إ.و. لورانس) مكتشف السيكلترون في جامعة كاليفورنيا ببيركلي عام 1930، واقفاً مع أوبنهايمر (في اليسار)، حيث كانا يدرسان الفيزياء النووية.

اليورانيوم ستقيد القوى النووية والكهرساكنة حركة جسيم ألفا. وحسب النظرية التقليدية، لا يمكن لهذا الجسيم مغادرة النواة. ولكن حسب الميكانيك الكمومي يمكن لجسيم ألفا أن (يمرق) Tunnel عبر الحواجز المحيطة ويتسلل خارجاً.

وخلال صيف عام 1928 فسَّر الفيزيائي (ج. كاموف) وبشكل مستقل (إ. كوندون) و(ر. كورني)، التفكك الإشعاعي بوساطة ظاهرة المروق. يقر مؤلفو الكتب المرجعية في هذه الأيام هذه الحقيقة، ولكنهم يلمحون أيضاً إلى أن هؤلاء العلماء قد اكتشفوا هذه الظاهرة، وهذا غير صحيح. فقبل ذلك بعدة أشهر، وتحديداً في الشهر 3 من ذلك العام تقدم أوبنهايمر بورقة علمية إلى (وقائع أكاديمية العلوم الوطنية) Proceedings of The National Academy of Sciences تتضمن أن هذه الحالة هي من تأثير الحقل الكهربائي في الذرة. وحسب التفسيرات التقليدية يمكن للذرة أن تنحل فقط تحت تأثير حقل كهربائي شديد. أما من وجهة النظر الكمومية، فيمكن لحقل ضعيف أن يفصل إلكترون من الذرة الأم لأن الإلكترون يمكن أن يجد نفقاً عبر الحواجز التي تقيده. لقد بيّن أوبنهايمر أن حقلاً كهربائياً ضعيفاً يمكن أن يزيح إلكترونات من سطح فلز. وقد طوّر (ج. بينك) و(هـ. روهرر) (من المختبر IBM للبحوث في زيوريخ) مجهر المسح النفقي Scanning Tunneling Microscope على أساس هذا المبدأ عام 1982، بعد 54 سنة من اكتشاف أوبنهايمر للظاهرة *[انظر: «مجهر المسح النفقي»] مجلة العلوم، العدد التجريبي الثاني (1986)، صفحة 102.*

الجسيمات والحقول:

أمضى أوبنهايمر شهوره الأخيرة في أوروبا من الشهر 1 إلى الشهر 1929/6 مع (و. باولي) Pauli في المعهد الفدرالي السويسري للتقانة في زيوريخ. وبعد هذه الخبرة تحول اهتمام أوبنهايمر من تطبيقات الميكانيك الكمومي إلى مسائل أساسية في الفيزياء. كان توقيت هذا التحول مثالياً. ففي ربيع ذلك العام، تلقى أوبنهايمر عرضاً من معهد كاليفورنيا للتقانة وجامعة كاليفورنيا في بيركلي حيث تتركز البحوث الفيزيائية في هذين المكانين على المسائل الفيزيائية الأساسية التي كانت تقع في مقدمة اهتمامات الفيزياء حينذاك. كان (ر. ماليكان) الذي ابتكر عبارة «الأشعة الكونية» Cosmic Rays عام 1925، يعمل في كالتك Caltech وكان (إ. لورانس) الذي اخترع (السيكلترون) Cyclotron في عام 1930 يبحث في الفيزياء النووية في بيركلي. لقد قَبِل أوبنهايمر العرضين وأخذ يُمضي الفصل الخريفي في بيركلي والربيعي في كالتك. وفي كلتا الجامعتين، استطاع استقطاب طلبة بارزين ساعدوه على إيصال الفيزياء الأمريكية إلى أعلى المستويات في العالم.

لقد كانت النظرية المقترحة من قبل ديراك من أكثر المسائل إثارة للجدل في أوائل الثلاثينيات. ففي 1928/1/2 تلقى محرر (وقائع الجمعية الملكية) Proceedings of the Royal Society مشروع ورقة علمية من ديراك بعنوان «النظرية الكمومية للإلكترون». كانت هذه المقالة ومقالة أخرى نُشرت بعد شهر من أكبر إنجازات ديراك. فلقد أبهجت المعادلة الموجية النسبية التي استنبطها لوصف الإلكترون الفيزيائيين لأنها أعطت (سبين) Spin

الجسيمات والقيمة الصحيحة للعزم المغنطيسي. ومع هذا فإن هذه المقالة أثارت مسائل محيرة. لقد كتب هايزنبرك إلى باولي في الشهر 1928/7 قائلاً: «إن أكثر الفصول إيلاماً في الفيزياء الحديثة كان ومازال نظرية ديراك». فالمشكلة الرئيسية في معادلة ديراك الموجية هي أنها تعطي حلولاً تتوافق مع كل من (سويات طاقة موجبة) Positive Energy States وعدد لا نهائي من سويات طاقة سالبة. وفي مثل هذا الوضع، يتنبأ الميكانيك الكمومي بأنه يمكن للإلكترونات أن تقفز إلى سويات طاقة سالبة، وهكذا يمكن لكل الإلكترونات أن تستقر هناك. وحسب ذلك لا يجوز أن نجد الإلكترونات العادية.

ولتجنب هذه الصعوبة، تصوّر ديراك أن سويات الطاقة السالبة هذه مشغولة بعدد لا نهائي من الإلكترونات. وفي حال عدم انشغال أي عدد محدد من هذه السويات فإنها ستبدو وكأنها ثقوب موجبة في بحر من الشحنات السالبة. ونشر ديراك في الشهر 1936/3 مقالة تؤكد أن هذه الثقوب الموجبة هي البروتونات. لكن أوبنهايمر الذي قرأ مقالة ديراك قبل نشرها، جادل في رسالة إلى المجلة (فيزيكال ريفيو) Physical Review نُشرت في الشهر نفسه بأنها ليست كذلك. وقد أشار إلى أنه لو كانت الثقوب الموجبة في نظرية ديراك هي بروتونات، فإن الإلكترونات والبروتونات يجب أن يفني بعضها بعضاً، أي إن المادة العادية سيكون لها مدة حياة تقارب 10^{-10} ثانية فقط. كما ذكر ملاحظة أخرى، هي أن الجسيمات الموجبة المفترضة في نظرية ديراك يجب أن تكون كتلتها مساوية لكتلة الإلكترون. وفي الحقيقة، إن هذه الثقوب الموجبة هي البوزترونات، والبوزترون هو الجسيم المضاد للإلكترون. ولكن في عام 1930 لم يكن هذا الجسيم معروفاً ووجوده غير متوقع. وفي هذا السباق مع ديراك لم يتمكن أوبنهايمر من التنبؤ بوجود البوزترون.

لقد بقيت نظرية البوزترون المستنتجة من أعمال ديراك تواجه المصاعب حتى بعد اكتشاف (س. أندرسون) Anderson (الفيزيائي من كالتك) للبوزترون عام 1932. وكان لدى أوبنهايمر والعديد من الفيزيائيين العاملين في حقل الإلكتروديناميك الكمومي شكوك كثيرة حول النظرية الأساسية. فمثلاً، في عام 1930 برهن أوبنهايمر أن تطبيق نظرية الإلكتروديناميك الكمومي (QED) المنشورة في العام نفسه من قبل هايزنبرك وباولي على التفاعلات بين الإلكترونات والبروتونات والحقول الكهرمغنطيسية أدى إلى انزياح خطوط الطيف إلى اللانهاية. استمر شك أوبنهايمر حول نظرية الإلكتروديناميك الكمومي خلال فترة الثلاثينيات كلها، وذلك بسبب الشذوذات في الأشعة الكونية التي سببها (الميون) Muon والجسيمات الأخرى عالية الطاقة التي كان يعمل عليها ولم تكن معروفة في ذلك الحين. ومن المعتقد أنه لو كان لدى أوبنهايمر النتيجة التجريبية حول ذرة الهيدروجين التي حصل عليها تلميذه (و. لامب) بُعيد الحرب، لكان بإمكانه حل مسألة اللانهايات المزعجة.

حاول أوبنهايمر في عام 1931 إيجاد معادلة للفوتون مماثلة لمعادلة ديراك للإلكترون. وقد فشل في مسعاه هذا، لكن أمكنه من خلاله أن يوضح الفرق الأساسي بين الجسيمات التي لها نصف عدد صحيح من السبين وتلك التي لها عدد صحيح منه، وهو الأمر الذي شكل لاحقاً أساس برهان باولي المنهجي للعلاقة بين السبين والإحصاء.

تكون المادة وفناؤها:

حسب ميكانيك الكم، فإن تكوّن المادة وفناءها ممكنان، على أن يخضعا لقانوني حفظ الطاقة والعزم الحركي. فأشعة غاما مثلاً يمكن أن تُنتج إلكتروناً وبوزتروناً في سيرورة (تفاعل) تسمى (إنتاج الزوج) Pair Production. ومن المستغرب أن أوبنهايمر لم يكن أول من أدخل فكرة إنتاج الزوج، ولكن في عام 1933، وبالتعاون مع تلميذه (م. بليست) أعطى أول وصف صحيح للظاهرة. وطور أوبنهايمر بعد سنة من ذلك، بالمشاركة مع تلميذه الباحث (و. فيري)، نظرية الإلكترون ــ بوزترون في شكلها الحالي. لقد بيّنا أن شحنة الإلكترون الملاحظة ليست الشحنة الحقيقية، وبذلك توقعا وجود الظاهرة التي تسمى (إعادة انتظام الشحنة) Charge Renormalization التي ساعدت على إيضاح بعض الصعوبات التي ظهرت باكراً بشأن اللانهايات في الإلكتروديناميك الكمومي.

في الثلاثينيات أجريت في الغلاف الجوي للأرض معظم تجارب فيزياء الطاقة العالية. وهناك قذفت جسيمات عالية الطاقة (في مجال البليون إلكترون فلط) ذات منشأ كوني ذرات الغلاف الجوي. وأثناء الدراسات التي كانت تجرى على الإشعاع الكوني باستخدام (حجيرة الغمام) Cloud Chamber في عام 1932، اكتشف أندرسون لأول مرة البوزترون. فإذا وُضعت صفيحة من المعدن، وليكن الرصاص، في حجيرة الغمام فإن مسار شعاع كوني منفرد ساقط على سطح الصفيحة العلوي سيعطي عدداً من المسارات منبعثة من نقطة على سطح الصفيحة السفلي. وقد برهن أوبنهايمر وتلميذه (ف. كارلسون) أن هذا الهطل من الأشعة الكونية يتألف بشكل عام من الفوتونات والإلكترونات والبوزترونات المتولدة نتيجة تشكل الإلكترون ــ بوزترون في ظاهرة إنتاج الزوج. ويمكن أن تكون سماكة صفيحة الرصاص متغيرة؛ إذ سجّل أوبنهايمر وكارلسون أنه إذا كانت الأشعة الكونية الأولية فوتوناً أو إلكتروناً، فإن صفيحة من الرصاص سماكتها 20 سم تمتص كل الأشعة الناتجة في مجالات الطاقة الملاحظة تجريبياً.

وقد كشفت بيانات إضافية أن النفوذية تتجاوز الأعماق التي يمكن ردّها إلى الفوتون أو الإلكترون. واستنتجوا من ذلك «أن هناك مركبة أخرى للأشعة الكونية». وبعد أشهر من ذلك وفي الوقت نفسه اكتشفت مجموعات في كالتك وهارفارد جسيماً جديداً. وفوراً قام أوبنهايمر وزميله في بيركلي (ر. سربر) بمقارنة هذا

الجسيم بجسيم آخر توقعه الفيزيائي الياباني (هـ. يوكاوا) لتفسير القوى النووية. وكان الجسيم المكتشف حديثاً في الحقيقة هو (الميون) Muon، في حين أن (البيون) Pion الذي توقعه يوكاوا اكتُشف لاحقاً.

بعيداً عن كالتك، كانت بحوث أوبنهايمر في بيركلي حول المسرعات. فعندما اكتشف (ج. شادويك) النيوترون عام 1932، انهارت نظرية تركيب النواة من إلكترون وبروتون، وحل محلها النمط الجديد: بروتون ـ نيوترون. وبدأ لورانس لأول مرة في ربيع 1933 بتسريع (الديترونات) Deuterons (التي تتألف من نيوترون واحد وبروتون) واستخدمها في قذف النوى الثقيلة. ووجد أن الديترونات تفكك النوى بكفاءة أكبر مما تفعله البروتونات. وبسهولة لاحظ لورانس مع مساعديه انبعاث جسيمات ألفا من نوى الدريئة.

وعندئذ جاءت النتيجة المحيرة: عندما تصطدم الديترونات عالية الطاقة بأي نواة، فإن الدريئة تطلق بروتونات في مجال ضيق من الطاقة. في الحقيقة، اعتبر تلوث جهاز لورانس بالديترونات سبباً لهذا اللغز المحير. لقد كانت كل البروتونات التي لوحظت ناتجة من اندماج الديترونات. ولكن قبل طرح هذا التفسير، أثارت الملاحظة المذكورة أسئلة حول التفاعلات التي يحرضها الديتريوم. وبيّن أوبنهايمر وتلميذه (م. فيليبس) في بيركلي أنه عندما يصطدم ديترون بنواة ثقيلة فإن هذه النواة تستطيع أسر النيوترون الموجود في الديترون وتحرير البروتون. إن التفاعل الذي صاغه أوبنهايمر وفيليبس، والذي يسمى الآن باسمهما، قد فسر بدقة النتيجة الغريبة التي توصل إليها لورانس.

النجوم النيوترونية والثقوب السوداء:

من المقبول الآن أن النجوم النيوترونية والثقوب السوداء هي من نتاج نشأة النجوم، ولأسباب نظرية فقد افتُرض وجودهما خلال الثلاثينيات. لقد كان أوبنهايمر مع تلميذيه (ج. فولكوف) و(هـ. سنايدر) مع طلائع القائمين بهذا التطوير. لقد اهتم أوبنهايمر وفولكوف معاً باقتراح باحث آخر قال بأن كتلة مركزية من النيوترونات يمكن أن تتشكل عند نفاد الطاقة الحرارية النووية في نجم كبير إلى حد مناسب. ولاختبار إمكانية حدوث هذا السيناريو باشر أوبنهايمر وفولكوف في إيجاد الفرق بين معالجة (تثاقلية) Gravitational للسيرورة تعتمد على نظرية نيوتن، وأخرى تعتمد على نظرية النسبية لأينشتاين.

لقد كشفت معادلة أوبنهايمر ـ فولوكوف التي تقول بتدرج الضغط ضمن النجم، أن الضغط يزداد بسرعة أكبر مما يمكن توقعه من الحسابات على أساس ميكانيك نيوتن كلما تحركنا أعمق نحو قلب النجم. وهكذا فإن نظرية أوبنهايمر فولوكوف المعتمدة على نظرية النسبية العامة تتوقع تأثيرات أكبر وأدق لقوى التثاقل من الحسابات المعتمدة على نظرية نيوتن. كما أن أوبنهايمر وفولكوف قاما بأول حساب مفصل مرسِّخَيْن بذلك بنية النجم النيوتروني وواضعين الأساس لنظرية النسبية العامة لبنية النجوم. وقبيل أن تظهر مقالته بالاشتراك مع فولكوف حول هذا العمل في عام 1939، أرسل أوبنهايمر رسالة إلى (ج. أهلنبيك) الفيزيائي النظري في جامعة ميتشيكان الذي اكتشف مع زميله (س. كاودسميث) (سبين) Spin الإلكترون. لقد كتب لـه: «إننا نعمل على الحلول المستقرة وغير المستقرة للكتل الكبيرة جداً.. ربما تكون لنجوم قديمة انهارت إلى قلوب نيوترونية.. لقد كانت النتائج مستغربة جداً..».

لقد أصبحت النتائج في الحقيقة أكثر غرابة. ففي وقت لاحق من ذلك العام نشر أوبنهايمر وسنايدر مقالة كلاسيكية بعنوان «حول انكماش تثاقلي مستمر»، ولاحظا أنه عندما تستهلك النجوم الكبيرة مصدرها الداخلي من الطاقة النووية، فإن وضعها النهائي يتقرر بمقدار الكتلة الممكن تناثرها، إما عبر طرد إشعاعي أو بدوران سريع يتبعه تطاير الأجزاء. وبعد اكتمال كل السبل الممكنة لانقذاف الكتل، فإن القلب المركزي المتبقي يترابط بعضه ببعض تحت تأثير قوى التثاقل. وإذا لم تتوافر قوى (حرارية نووية) Thermonuclear لتقوم بدور القوى المعاكسة الموازنة، فإن القلب سيستمر في الانهيار.

وأثناء حدوث هذا الانهيار التثاقلي، فإن الضوء المنبعث من القلب يصبح أكثر انحرافاً نحو الأحمر، مما يعني أن موجته تزداد طولاً؛ كما أن المسار الذي يستطيع هذا الضوء الهرب عبره إلى الفضاء يصير أضيق كثيراً حتى ينغلق المسار على نفسه تاركاً وراءه مصدراً للتجاذب التثاقلي مُنعزلاً عن الملاحظة الخارجية. ولبناء هذا التصور خرج أوبنهايمر وسنايدر بأول حساب يُظهر كيف يتشكل الثقب الأسود. وفي الشهر 1949/4 ظهرت دلائل مؤكدة تم ملاحظتها بالعين عبر مقراب (تلسكوب) هابل الفضائي عن وجود ثقب أسود هائل في مركز المجرة M87، وهي الأكبر والأشد لمعاناً في (العنقود فيركو) Virgo Cluster.

لقد كان إسهام أوبنهايمر في الفيزياء عبر هذا القرن واسعاً وعميقاً وخالداً. فتقريب بورن ـ أوبنهايمر ونفوذ الإلكترونات عبر الحواجز الكمونية ونظرية هطل الأشعة الكونية والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء كلها جزء حيوي من الفيزياء المعاصرة.

وقد تم لأول مرة رصد (النجوم النبّاضة) Pulsars، وهي معروفة الآن كنجوم نيوترونية، في سنة 1967، وهي السنة التي تُوفي فيها أوبنهايمر بالسرطان في برنستون. ولو امتد به العمر لاستمتع بالتقدير الذي مُنح لاكتشافاته في الفيزياء قبل الحرب، تلك الاكتشافات التي طغت عليها أعماله خلال الحرب وشهرته بعدها.

المؤلف

John S. Rigden

حصل على الدكتوراه من جامعة جون هوبكنز عام 1960، وهو حالياً مدير برنامج الفيزياء في معهد الفيزياء الأمريكي. وعمل حديثاً مديراً لمشروع تطوير معايير الثقافة العلمية في أكاديمية العلوم الوطنية. وكان بين عامي 1978 و1988 محرر مجلة الفيزياء الأمريكية. إضافة إلى تحريره مجموعة مقالات تحت عنوان: «أغلب الأشياء الجيدة: ذكريات ريتشارد فاينمان»، فقد ألف كتابين هما: «الفيزياء وصوت الموسيقى» و«رابي: العالم والمواطن».

مراجع للاستزادة

THREE TRIBUTES TO J. ROBERT OPPENHEIMER. Hans A. Bethe Institute For Advanced Study, Princeton, N. J., 1967.

J. ROBERT OPPENHEIMER, 1904-1967. Hans A. Bethe *In Biographical Memoirs Of Fellows Of The Royal Society*, Vol. 14, Pages 391-416; 1968.

OPPENHEIMER. I. I. Rabi, Robert Serber, Victor F. Weisskopf, Abraham Pais And Glenn T. Seaborg. Charles Scribner's Sons, 1969.

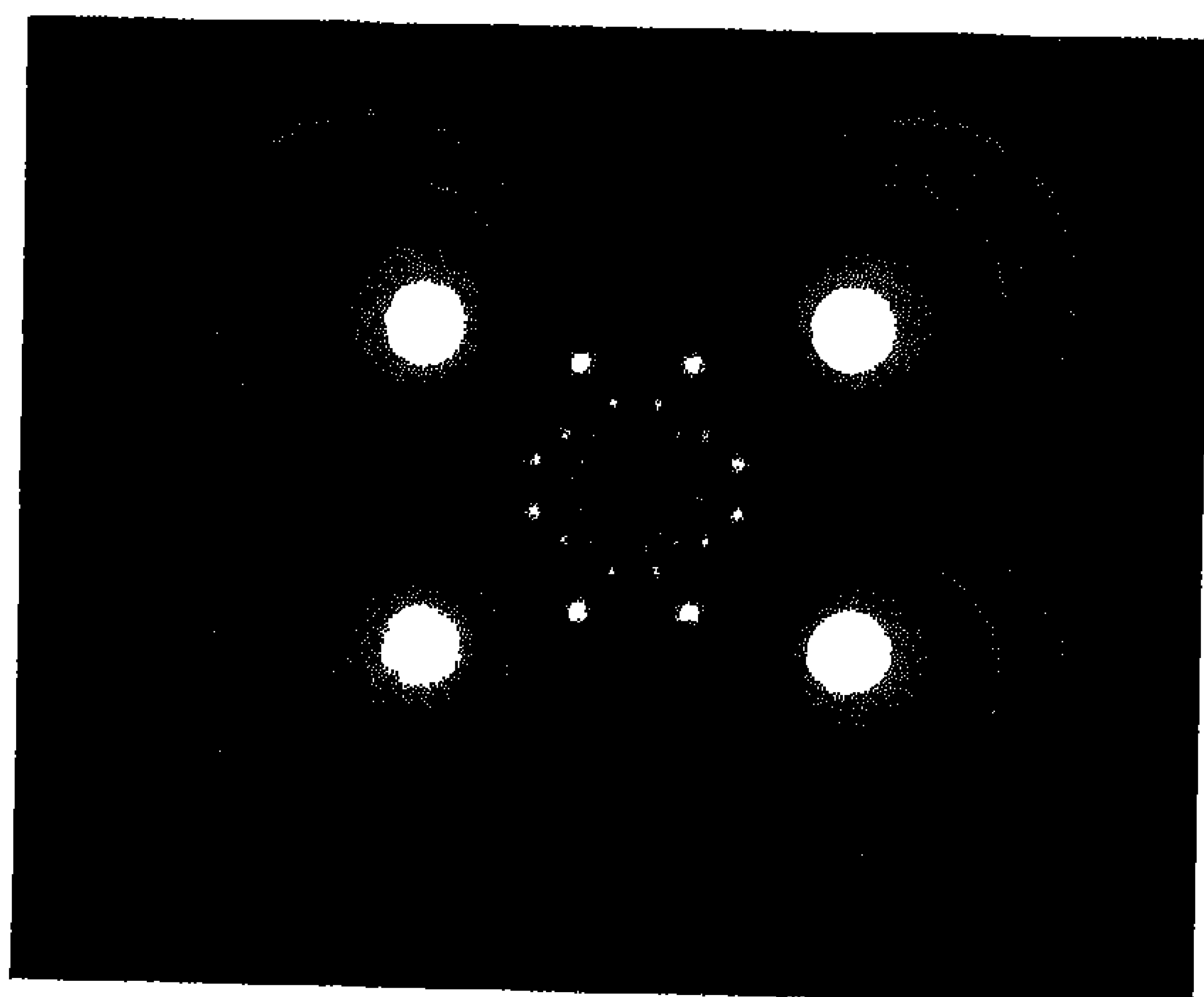
THE OPPENHEIMER CASE: SECURITY ON TRIAL. Philip M. Stern. Hart-Davis, 1971.

J. ROBERT OPPENHIMER: LETTERS AND RECOLLECTIONS. Alice Kimball Smith A d Charles Weiner. Harvard University Press, 1980.



تفحق





نظرية الأوتار الفائقة(*)

بقلم: بريان غرين
أستـاذ الفيزيـاء والرياضيات
في جامعتي كولومبيا وكورنيل

كان الفيزيائيون على دراية، طيلة أكثر من نصف قرن، وفي خضم بعض أكثر الإنجازات العلمية إثارة في التاريخ، بأن غيوماً سوداء تلوح لهم بعيداً في الأفق. كان يقلقهم أن يروا أن النظريتين الأساسيتين اللتين تُعدان دعامتي الفيزياء الحديثة، لاتنسجمان واحدتهما مع الأخرى، أو بتعبير آخر، لا يمكن أن تكونا صحيحتين معاً. تضع أولى هاتين النظريتين، وهي نظرية النسبية العامة لأينشتاين، الإطار النظري لوصف الكون بأبعاده الكبيرة وما فيه من نجوم ومجرات وتجمعات لها وما بعدها في مدى الكون اللامتناهي، وتضع الثانية، وهي نظرية ميكانيك الكم، الإطار النظري لوصف الكون بأبعاده الصغيرة وما فيه من جزيئات وذرات وجسيمات دون ذرية، مثل الإلكترونات والكواركات. وتمكن الفيزيائيون خلال سنوات طويلة من البحث من التحقق تجريبياً وبدقة لا متناهية من صحة التوقعات والتنبؤات التي وضعتها كل من هاتين النظريتين. إلاّ أن تلك التوقعات والتنبؤات النظرية ذاتها قادتهم إلى نتيجة مقلقة تتلخص في أن هاتين النظريتين اللتين عبّرتا عن التطور الهائل الذي تحقق في الفيزياء خلال مئة السنة الأخيرة، ممّا سمح بتفسير توسّع الكون وتمدده من جهة، وبنية المادة من جهة أخرى، متناقضتان فيما بينهما.

وقد يتساءل المرء عن سبب هذا التناقض إن لم يكن قد سمع به قبلاً. وليس الجواب عن تساؤله بعسير. ذلك أن الفيزيائيين، فيما عدا حالات نادرة جداً، كانوا يدرسون إما أشياء صغيرة وخفيفة (كالذرات ومكوناتها) أو أشياء كبيرة وثقيلة (كالنجوم والمجرات)، ولم يدرسوا هذين النوعين معاً أو يدرسوا تقاطعاتهما، وهو ما كان معناه حاجتهم إلى استخدام الميكانيك الكمي وحده، أو النسبية العامة وحدها، متجاهلين الآخر تماماً في كلتا الحالتين، واستمر ذلك حوالي خمسين سنة.

لكن الكون ليس على مثل هذه الصورة، فلو نظرنا إلى ثقب أسود لوجدنا في أعماقه كتلة هائلة وقد انسحقت فصغر حجمها إلى حد كبير. وقد يكون الكون كله نشأ عند لحظة الانفجار الأعظم من شذرة مجهرية صغيرة تبدو حبة الرمل ضخمة تجاهها، وهو ما يعني وجود أوضاع فيها أشياء صغيرة جداً، إلاّ أنها ثقيلة جداً، مما يقتضي، لوصفها استخدام نظريتي ميكانيك الكم والنسبية العامة معاً. وكما سنرى لاحقاً فإن معادلات هاتين النظريتين ستبدأ بالترنّح عند جمعهما معاً، فتبدوان كسيارة تسير بعجلات تالفة أو كأسئلة ذات دلالات فيزيائية واضحة تلقى إجابات لا معنى فيزيائياً لها. ولو تركنا جانباً ماهية الثقب الأسود ولحظة بدء الكون، وتقبلنا عدم فهمنا وإدراكنا لهما، فإننا لن نستطيع تجنب الشعور بأن عدم الانسجام بين ميكانيك الكمّ وبين النسبية العامة ليس سوى دلالة على حاجتنا لفهم أعمق للطبيعة، إذ هل يمكن لاحقاً أن يكون الكون في جوهره وأساسه منقسماً على نحو يوصف فيه بأشيائه الكبيرة بمجموعة من القوانين، وبأشيائه الصغيرة بمجموعة أخرى منها غير منسجمة معها؟

ويأتي الجواب عن ذلك بالنفي، وبصوت عال تطلقه نظرية الأوتار الفائقة الحديثة العهد، بالمقارنة مع نظريتي ميكانيك الكم والنسبية العامة، الأقدم منها والأكثر رسوخاً واستقراراً. قد تبيّن من أبحاث دقيقة ومكثفة قام بها فيزيائيون ورياضياتيون في سائر أرجاء العالم خلال العقد الماضي، أن ما تقدمه الأوتار الفائقة من وصف للمادة في جوهرها وأساسياتها يحمل معه الحل لإزالة التناقض القائم بين تلك النظريتين؛ وتذهب هذه النظرية إلى أبعد من ذلك إذ تبين حاجة كل واحدة من النظريتين إلى الأخرى إذا ما أريد منها أن تكون منطقية، وهو ما يعني بمفهوم نظرية الأوتار الفائقة أن تزاوج قوانين ميكانيك الكمّ وقوانين النسبية العامة ليس أمراً مستحباً فحسب، بل هو أمر لا غنى عنه.

وتأخذ نظرية الأوتار الفائقة (وسندعوها اختصاراً نظرية الأوتار) هذا التزاوج خطوة عملاقة أخرى نحو الأمام تتجلى في وضع نظرية واحدة للكون. كان أينشتاين قد سعى طيلة نحو ثلاثة عقود إلى وضع نظرية موحّدة لكل قوانين الفيزياء تندرج في إطارها

(*) الكون الأنيق: ترجمة الدكتور عبد الحليم منصور ـ أستاذ في كلية العلوم بجامعة دمشق. والدكتور نضال شمعون ـ الأستاذ في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا في دمشق.

وفي نسيج واحد كل قوى الطبيعة وكل مكونات المادة، وفشل في مسعاه. أما الآن، ومع إطلالة الألفية الثالثة، فإن أنصار نظرية الأوتار يدّعون أن خيوط هذا النسيج الواحد بدأت تتّضح للعيان، وأن لهذه النظرية القدرة على تبيان أن كل ظواهر الكون، من حركة الكواركات في الذرات إلى رقصة الفالس التي تدور فيها النجوم الثنائية واحدها حول الآخر، ومن كرة النار البدائية التي رافقت الانفجار الأعظم إلى الحركة الدوامية الجميلة للمجرات، ليست إلاّ انعكاساً لمبدأ فيزيائي واحد وكبير أو لمعادلة أساسية واحدة.

ولما كانت الخصائص المميّزة لنظرية الأوتار تتطلب منّا أن نغيّر جذرياً مفاهيمنا عن الزمان والمكان والمادة، فإن وقتاً سوف يمضي قبل أن نألف مفاهيمها الجديدة ونعتاد عليها ونتعامل معها بسهولة؛ وعندها، وكما سنرى لاحقاً، سوف تبدو لنا كتطور مثير، إلا أنه طبيعي، للاكتشافات الثورية التي تحققت في الفيزياء خلال مئة السنة الأخيرة. وسنرى أن التعارض ما بين ميكانيك الكم والنسبية العامة لم يكن التعارض الوحيد الذي عرفته الفيزياء، بل أنه، في الحقيقة، الثالث من سلسلة تعارضات أساسية شهدها القرن الماضي واقتضى كل واحد منها إعادة نظر شاملة في فهمنا للكون.

التعارضات الثلاثة:

يتعلق أول هذه التعارضات بالخصائص المميّزة لحزمة الضوء، ويرجع تاريخه إلى أوائل القرن التاسع عشر، ويمكننا أن نعبر عنه بإيجاز بقولنا أنه، تبعاً لقوانين نيوتن في الحركة، فإن بوسع المرء أن يلحق بحزمة ضوئية صادرة إذا ما جرى بسرعة كافية، في حين أنه لا يقدر على ذلك، تبعاً لقوانين ماكسويل في الكهرطيسية. وقد تغلب آينشتاين على هذا التعارض عن طريق نظريته في النسبية الخاصة، إذ قلب مفهومنا للزمان والمكان رأساً على عقب، فلم يعودا، تبعاً لهذه النظرية، مفهومين عامين جامدين نشعر بهما كلنا بالطريقة ذاتها، بل أصبحا مفهومين مطواعين ليّنين يبدوان على نحو يتعلق بحالة المراقب وبحركته.

إلاّ أن هذه النظرية ذاتها مهدت الطريق أمام ظهور التعارض الثاني على خشبة المسرح، إذ كان من نتائجها القول باستحالة تحرك أي شيء (وفي الواقع أي جسم أو تأثير أو اضطراب) بسرعة أكبر من سرعة الضوء. لكن نظرية الثقالة لنيوتن، المرضية منطقياً والمثبتة تجريبياً، تقتضي وجود تأثيرات تنتقل، على نحو آني، عبر مسافات شاسعة في الفضاء. ومرة أخرى يرجع الفضل إلى آينشتاين في التصدي لهذا التعارض وفي إيجاد حل له، عبر تقديمه مفهوماً جديداً للثقالة عن طريق نظرية النسبية العامة (1915). وكما بدلت النسبية الخاصة مفاهيمنا السابقة عن الزمان والمكان، كذلك فعلت النسبية العامة، إذ غدا بوسع الزمان والمكان، وعدا تأثّرهما بحركة المراقب، الانحناء والالتفاف تحت تأثير المادة أو الطاقة؛ وهذه التشوهات التي تلحق بنسيج الزمان والمكان هي ما ينقل قوى الثقالة من مكان إلى آخر كما سوف نرى. وبذلك يمكن القول إن الزمان والمكان لم يعودا ستارة المسرح الخلفية التي تُعرض أمامها أحداث الكون، بل هما ممثلان فاعلان في هذه الأحداث تبعاً لمفاهيم نظريتي النسبية.

وكما وضعت النسبية العامة حداً لهذا التعارض الثاني فإنها كانت بدورها سبباً في طرح تعارض جديد ثالث؛ لقد تم تطوير مبادئ ميكانيك الكمّ للإجابة عن تساؤلات أساسية بدت عند تطبيق مفاهيم فيزياء القرن العشرين على العالم المجهري، وظهر التعارض الثالث بسبب عدم الانسجام الذي نشأ بين مفاهيم هذا الميكانيك ومفاهيم النسبية العامة. فالمكان الذي تصفه النسبية العامة بأنه ذو شكل هندسي ينحني بلطف، يتناقض وتصرف الكون القلق الذي يقتضيه الميكانيك الكمي. وقد عُدَّ هذا التناقض القضية الأساسية في الفيزياء الحديثة، وكان علينا أن ننتظر حتى أواسط الثمانينيات لتحمل إلينا نظرية الأوتار حلاً له. ولهذه النظرية القائمة على مفاهيم نظريتي النسبية العامة والخاصة مفاهيمها الخاصة بها التي تطلبت بدورها إعادة نظر جذرية في مفهومنا للزمان والمكان. إن معظمنا يرى الكون عالماً ذا ثلاثة أبعاد فضائية، أما نظرية الأوتار فلا تراه كذلك بل تلمح فيه أبعاداً أكثر مما تراه أعيننا، تلتف بإحكام ضمن نسيج الكون القابل للطي. وسوف تكون هذه الأفكار الأساسية عن طبيعة الزمان والمكان دليلنا وموجهنا في ما سوف يأتي، إذ يمكن في الحقيقة قراءة نظرية الأوتار على أنها قصة الزمان والمكان منذ آينشتاين.

وحتى نرى على نحو أفضل ما قدمته لنا هذه النظرية، فإننا سنرجع قليلاً إلى الوراء، ونرى بإيجاز ما تعلمناه سابقاً عن البنية المجهرية للكون.

الكون في أصغر أبعاده: ماذا نعرف عن المادة؟

افترض اليونانيون القدامى أن الكون مؤلّف من مكونات صغيرة جداً غير قابلة للتجزئة، سمّوها الذرات (atoms، أي الجزء الذي لا يتجزأ)، وخمنوا أنه، كما تُبنى من أبجدية ذات عدد محدود من الأحرف، تركيبات كلامية لا حصر لها، كذلك يُبنى الكون بكل ما فيه، من عدد محدود جداً من هذه الذرات، الوحدات العنصرية الأساسية. وكان تخمينهم صائباً كما لو أنهم كانوا يعلمون الغيب. والآن، وقد مضى أكثر من ألفي عام على افتراضهم هذا، فإننا لانزال نعتقد بصحته، رغم ما لحق من تبدّل في نظرتنا إلى هذه الوحدات الأساسية. لقد توصل العلماء في القرن التاسع عشر إلى القول بأن المادة التي نراها حولنا على شكل عناصر مثل الأكسجين والكربون (ومركّبات من هذه العناصر)، تتكون من وحدات أساسية، حافظوا على إطلاق اسم الذرات عليها؛ غير أن ما تحقق من كشوفات من بدايات ذلك القرن وحتى ثلاثينياته، على أيدي ج.ج. تومسون وإرنست رذرفورد

ونيلزبور وجيمس تشادويك، بيّن أن هذه الوحدات تقبل التجزئة، رغم تسميتها الدالة على عدم إمكانية ذلك. وتم وضع النموذج الذري، الشبيه بالنظام الشمسي، وفيه تتكون الذرات من نوى، تضم بروتونات ونترونات، تدور حولها إلكترونات على مدارات محددة.

وظن الفيزيائيون لمدة طويلة أن هذه البروتونات والنترونات والإلكترونات هي الوحدات التي لا يمكن تجزئتها. غير أن تجارب لاحقة أجريت في المسرّع الخطي في ستانفورد في سنة 1968، أظهرت أن البروتونات والنترونات ليست جسيمات أساسية عنصرية، بل إنها تتكون من وحدات أصغر منها هي الكواركات. (وكان الفيزيائي النظري ميري غيل مان قد تنبأ، قبل ذلك، بوجودها عن طريق الحدس، وهو الذي أطلق عليها هذه التسمية التي استقاها من عبارة وردت في مقطع مسجوع معناه: «ثلاثة كواركات للسيد مارك»، في قصة «يقظة فينغانز لجيمس جويس)، وأظهرت هذه التجارب أن هناك نوعين من الكواركات سُميًا بالعلوي والسفلي؛ فالبروتون يتكون من كواركين علويّين وكوارك سفلي، في حين يتكون النترون من كواركين سفليّين وكوارك علوي. وهكذا فإن كل ما في عالمنا وسواه من عوالم مكوّن من تركيبات لإلكترونات وكواركات علوية وكواركات سفلية؛ وليس هناك أي دليل تجريبي على أن أيّاً من هذه المكونات الثلاثة يتكون بدوره من وحدات أصغر من ذلك. إلاّ أن هناك بالمقابل أدلة كثيرة تبيّن أن في تلك العوالم وحدات أساسية عنصرية أخرى، حيث برهن فريدريك رينز وكلايد كووان، تجريبياً وفي أواسط الخمسينيات، على وجود وحدة أساسية رابعة هي النترينو، الذي كان العالم ولفغانغ باولي قد تنبأ بوجوده في مطلع الثلاثينيات. وكان التأكد من هذا الوجود في غاية الصعوبة، فهو جسيم "شبحي" قلّ ما يتفاعل مع مكوّنات المادة الأخرى. فنترينو ذو طاقة متوسطة اعتيادية، يخترق مادة الرصاص، وقد يجتاز مليارات الأميال منها دون أن تتأثر حركته من جرّاء ذلك. إن مليارات ومليارات من هذه الوحدة الأساسية التي تحملها الأشعة الكونية، تخترق أجسامنا وتتابع مسارها خلال رحلتها في باطن الأرض. كما اكتشف الفيزيائيون خلال دراستهم الأشعة الكونية في أوائل الثلاثينيات، جسيماً آخر سمّوه الميون، وهو كالإلكترون إلا أنه أثقل منه بحوالي 400 مرّة؛ وقد استقبل الفيزيائي إيسيدور إسحق رابي، الحائز على جائزة نوبل، نبأ اكتشاف الميون بحماس فاتر دفعه إلى التساؤل عمّن أمر بخلقه. لأنه لم تكن هناك أي معضلة في الوضع الكوني للجسيمات يتطلب تفسيرُها وجودَ مثل هذا الجسيم. ومع ذلك فقد كان الميون موجوداً دوماً، وستكون هناك جسيمات أخرى سواه.

تابع الفيزيائيون، مزودين بتقنيات محدّثة ومطوّرة باستمرار، طريقهم في صدم المادة وقذفها بطاقات عالية جداً سمحت لهم بأن يحققوا للحظات شروطاً لم تلحظ منذ حدوث الانفجار الأعظم. وبحثوا ونقّبوا فيما بين مخلفات عمليات القذف تلك، عن مكونات عنصرية جديدة يضيفونها إلى قائمة ما يعرفونه منها، فوجدوا أربعة أنواع جديدة من الكواركات أسموها الفاتن والغريب والذروي والقعري؛ كما وجدوا قريباً آخر للإلكترون أثقل من الميمون، سمّوه التاو. ووجدوا كذلك جسيمين آخرين تشبه خصائصهُما خصائصَ النترينو (وأسموهما لذلك نترينو الميون ونترينو التاو تمييزاً لهما عن النترينو الأصلي الذي أصبح يعرف بنترينو الإلكترون). تبدو هذه الجسيمات عند حوادث الصدم التي تتم بطاقات عالية جداً، وهي تبقى لفترة قصيرة جداً من الزمن، لا يمكن معها عدّها من مكوّنات المادة التي نلقاها في حياتنا اليومية. لكن القصة لم تنته فصولاً إذ أن لكلٍ من هذه الجسيمات قريناً مضاداً، يماثله في كتلته ويعاكسه في شحنته الكهربائية. (وقد يتعاكسان بشحنات أخرى ترافق أنواعاً أخرى من القوى)؛ فللبوزيترون مثلاً، وهو مضاد الإلكترون، كتلة الإلكترون وشحنة مقدارها +1 في حين أن شحنة الإلكترون تساوي -1. وعند اصطدام الجسيمات بمضاداتها يفني واحدها الآخر وتتحرر طاقة، وهو ما يفسر ندرة وجود الجسيمات المضادة في عالمنا.

تعرّف الفيزيائيون في هذه الجسيمات على نمط تناظري، يبدو من خلال معطيات الجدول 1، حيث صنّفت ما بين ثلاث زمر، تعرف عادة بالعائلات، في كل واحدة منها كواركان وإلكترون، أو أحد قرينيه، وواحد من النترينوهات الثلاثة. تتشابه هذه الوحدات في خصائصها فيما بين العائلات الثلاثة باستثناء كتلتها التي تزداد من عائلة إلى أخرى. كما بيّنوا أن كل ما حولنا من أشياء يتكون من تركيبات من جسيمات هذه العائلات الثلاثة ومن مضاداتها. ومما يسترعي الانتباه في هذا المجال، قدرة الفيزيائيين في الوقت الحاضر على سبر أغوار المادة إلى أبعاد من مرتبة جزء من بليون بليون جزء من المتر.

العائلة الأولى		العائلة الثانية		العائلة الثالثة	
الجسيم	الكتلة	الجسيم	الكتلة	الجسيم	الكتلة
إلكترون	0.00054	ميون	0.11	تاو	1.9
نترينو الإلكترون	$<10^{-8}$	نترينو الميون	0.0003>	نيترينو التاو	0.033>
كوارك علوي	0.0047	كوارك فاتن	1.6	كوارك ذروي	189
كوارك سفلي	0.0074	كوارك غريب	0.16	كوارك قعري	5.2

الجدول 1: عائلات الجسيمات الأساسية الثلاث وكتلها (مقدرة بواحدات كتلة البروتون). لم تُحدد حتى الآن كتلة النترينو تجريبياً.

إن إلقاء نظرة سريعة على هذا الجدول، سوف يجعلنا نحس بالارتباك الذي اعترى العالم رابي عند اكتشاف الميون. فمع أن تصنيف الجسيمات إلى عائلات يوحي ببعض مظاهر الترتيب، إلاّ أنه لاتزال تطفو على السطح تساؤلات كثيرة تتعلق بأمور متعددة. لماذا

هناك هذا العدد الكبير من الجسيمات الأساسية، علماً بأن معظم ما في عالمنا يتكون من إلكترون ومن كواركات علوية وسفلية فقط؟ لماذا وضعت ثلاث عائلات وليس عائلة واحدة أو أربع عائلات أو أي عدد آخر منها؟ لماذا يكون لهذه الجسيمات هذا الطيف الواسع من الكتلة الذي لا يخضع ظاهرياً لأي ترتيب؟ لماذا يكون التاو أثقل من الإلكترون بـ 3520 مرّة، ويكون الكوارك الذروي أثقل بـ 50200 مرّة من الكوارك العلوي؟ تبدو هذه الأرقام العشوائية أمراً غريباً، فهل كان ذلك بمحض المصادفة أم كان أمراً إلهياً، أم أن هناك تفسيراً علمياً لهذه الخصائص الأساسية لمكونات عالمنا.

القوى وموقع الفوتون:

وتتعقد الأمور أكثر إذا ما أخذنا بالاعتبار أيضاً قوى الطبيعة. والعالم حولنا متخم بوسائل التأثير التي تتنقل بها هذه القوى: فبوسعنا ضرب الكرات بالعصيّ، كما بوسع المتحمّسين منا إلقاء أنفسهم من على سطح برج ماء وبوسع المغانط الكبيرة أن تبقي القطارات الفائقة السرعة معلّقة فوق قضبانها المعدنية؛ وكما تؤثر المواد المشعة في عدادات غايغر، فإن بعضها قد يفجر قنبلة نووية. والإنسان يؤثر فيما حوله من أشياء بوسائل عدة من دفع وجر وشدّ ورجّ ومطّ وفتل وتدوير وتبريد وتسخين وتحطيم وحرق وسواها وسواها. فالتأثيرات المتبادلة بين مختلف الأشياء التي نراها في حياتنا اليومية لاحصر لها. وقد تمكن العلماء خلال مئة السنة الأخيرة من جمع دلالات تشير إلى أن هذه التأثيرات، وأيّاً كانت طبيعة المواد المتفاعلة، تُردّ إلى تركيبات لأربعة أنواع من القوى هي **قوة الثقالة والقوة الكهرطيسية والقوة النووية الضعيفة والقوة النووية الشديدة.**

تعدّ قوة الثقالة الأكثر شيوعاً بين هذه القوى، فهي المسؤولة عن بقاء كوكبنا في مداره حول الشمس، وهي ما يتيح لنا الوقوف وأقدامنا على سطح الأرض. وتعد كتلة جسم ما مقياساً لقوة الثقالة التي يؤثر بها هذا الجسم أو يتأثر بها في تعامله مع أجسام أخرى. يلي هذه القوة شيوعاً وانتشاراً القوة الكهرطيسية التي يرجع إليها الفضل في تمتعنا بمنجزات الكشوف الحديثة من كهرباء نرى أثرها في أجهزة الإنارة وأجهزة التلفزيون والهاتف والحواسيب. تغطي شدة هذه القوة طيفاً واسعاً، فهي في الأثر الهائل للعواصف الرعدية كما هي في الأثر اللطيف لمداعبة باليد؛ تقوم الشحنة الكهربائية التي يحملها جسم ما، في هذه القوة، بالدور ذاته الذي تقوم به كتلة هذا الجسم بالنسبة لقوة (الثقالة)، فهي تدل على شدة التأثير الكهرطيسي الذي يتبادله مع أجسام أخرى.

أما القوتان الأساسيتان الأخريان فلا يُحَسُّ بهما في حياتنا اليومية لأن مداهما لايتعدى الأبعاد الذرّيّة. تُعَدُّ أولاهما، وهي القوة النووية الشديدة، مسؤولة عن التصاق الكواركات بعضها ببعض ضمن البروتونات والنترونات، وعن ترابط هذه الأخيرة ضمن النوى الذرية؛ أما الثانية، وهي القوة النووية الضعيفة، فتتدخل في التحولات الجسيميّة أكثر من ظهورها كقوة جاذبة أو دافعة، وهي المسؤولة عن التحلل الإشعاعي لمواد مشعة كالأورانيوم والكوبالت.

وقد تلمّس الفيزيائيون في القرن الماضي خاصتين مشتركتين بين أنواع هذه القوى كافة، تتجلى أولاهما، وكما سنعرض في الفصل الخامس، بوجود جسيم على مستوى مجهري، يرافق كل نوع من القوى الأربعة، يُعَدُّ أصغر رزمة أو كمّة للقوة التي يرافقها.

فالفوتونات التي ترافق القوة الكهرطيسية هي الجسيمات الأصغرية لهذه القوة؛ أما المكوّنات الأصغرية المرافقة للقوى النووية الضعيفة والشديدة فهي جسيمات ندعوها، على التوالي، **بوزونات المعيار الضعيف والغليّونات.** (تعني الغليّونات بالإنكليزية الصمغيات، لذلك فهي تسمية ناجحة من الناحية الوصفية، حيث يمكن اعتبارها المكونات المجهرية للحقل الصمغي القوي الذي يجمع النوى الذرية فيما بينها)(*). وقد برهن العلماء تجريبياً، حتى نهاية عام 1984، على وجود هذه الأنواع الثلاثة من جسيمات القوى وحددوا خصائصها، المبينة في الجدول 2؛ وهم يعتقدون بوجود جسيم رابع يرافق قوة الثقالة، سمّوه الغرافيتون(**)، مع عدم تمكنهم حتى الآن من البرهان تجريبياً على وجوده.

أما الخاصة الثانية المشتركة بين أنواع هذه القوى فتتعلق بماهية السمة في الجسيمات التي تحدد كيفية تأثرها بحقول القوى. وكما تحدد كتلة الجسيم كيفية تأثره بقوة الثقالة، وتحدد شحنته الكهربائية كيفيةَ تأثره بالقوة الكهرطيسية، فإن في الجسيم سمتين مميّزتين أخريين هما الشحنة الشديدة والشحنة الضعيفة، تحددان كيفية تأثره بالقوى النووية الشديدة وبالقوى النووية الضعيفة على التوالي. وكما في حال كتل هذه الجسيمات، ومع أن الفيزيائيين التجريبيين قاسوا بدقة هذه الشحنات، فليس هناك أي تفسير لتكوّن عالمنا من هذه الجسيمات الخاصة بكتلتها وشحنتها الخاصة أيضاً.

القوة	الجسيم المرافق لها	كتلة الجسم
النووية الشديدة	الغليون	0
الكهرطيسية	الفوتون	0
النووية الضعيفة	بوزونات المعيار الضعيف	86...97
الثقالة	الغرافيتون	0

الجدول 2: أنواع القوى الأربع وجسيماتها المرافقة وكتلتها مقدرة بمضاعفات كتلة البروتون. (هناك أنواع من جسيمات القوة النووية

(*) من أجل ذلك يستخدم بعضهم مصطلح "غرئون" المشتق من كلمة "الغراء" للتعبير عن جسيم القوة الشديدة. المترجم

(**) يستخدم بعضهم مصطلح "جذبون"، المشتق من كلمة "الجاذبية"، للتعبير عن جسيم قوة الثقالة، حيث أن هذه الأخيرة تتمتع دوماً بالخاصة التجاذبية. المترجم

الضعيفة تأخذ كتلتها واحدةً من قيمتي الكتلة المذكورتين. وقد بينت الدراسات النظرية انعدام كتلة الغرافيتون).

ومع وجود السمات المشتركة لهذه القوى الأساسية، فإن تفحّصها عن قرب لا يقود إلاّ إلى طرح مزيد من التساؤلات حولها: ما سبب وجود أربعة أنواع منها وليس خمسة أو ثلاثة أو نوعاً واحداً فقط؟ لماذا كان لهذه القوى مثل هذه الخصائص المتباينة؟ ولماذا تجتمع القوة الشديدة والقوة الضعيفة ويكون تأثيرهما في أمداء من مرتبة الأبعاد النووية، في حين يكون للقوة الكهرطيسية ولقوة الثقالة أمداء تأثير غير محدودة، وما هو سبب الاختلاف الكبير في الشدّات الذاتية لهذه القوى؟

وحتى نبين مدى الاختلاف الذي يطرحه التساؤل الأخير، تصور نفسك وقد أمسكت إلكتروناً بكفك اليسرى وآخر بكفك اليمنى، وقرّبت كفّيك واحدهما من الآخر. سوف يعمل التجاذب الثقالي المتبادل بين هذين الجسيمين المشحونين بشحنتين كهربائيتين متماثلتين على التقريب فيما بينهما، في حين سوف يعمل تدافعهما الكهرطيسي على إبعاد واحدهما عن الآخر؛ ونتساءل أي التأثيرين هو الأقوى؟ ويأتي الجواب قاطعاً بأن الغلبة لقوة التنافر الكهرطيسي الأكبر بـ 10^{42} مرّة،أي بـ مليون مليار مليار مليار مليار مرّة. ولمقارنة شدتي هاتين القوتين تخيل أن طول إبهامك اليمنى يمثل شدة قوة الثقالة؛ إن على طول إبهامك اليسرى، حتى تمثل شدة القوة الكهرطيسية، أن تمتد إلى مسافات تتجاوز حدود عالمنا!! ونتساءل لماذا لا نشعر بهيمنة هذه القوة على قوة الثقالة؟ والجواب عن ذلك بسيط. ففي معظم الأجسام التي حولنا مقادير متساوية من شحنات كهربائية موجبة وسالبة، تلغي تأثيراتها المتبادلة بعضها بعضاً، في حين ليس هناك مثل هذا الإلغاء في حالة قوة الثقالة لأنها قوة تجاذب فقط تشد الأجسام بعضها إلى بعض وتكبر بكبر هذه الأجسام. لكن الكلام عن أساسيات الأمور يدفعنا إلى القول بأن قوة الثقالة قوة ضعيفة جداً (وهو ما يفسر الصعوبة التي يلقاها الباحثون التجريبيون في صدد إثبات وجود الغرافيتون، لأن البحث عن الكمّة الصغرى لهذه القوى يُعَدُّ تحدياً كبيراً). كما بينت التجارب أن القوة الشديدة أقوى بمئة مرة من القوة الكهرطيسية وبمئة ألف مرة من القوة الضعيفة. ومرة أخرى لا مندوحة من التساؤل عن سبب تمتّع عالمنا بمثل هذه السمات.

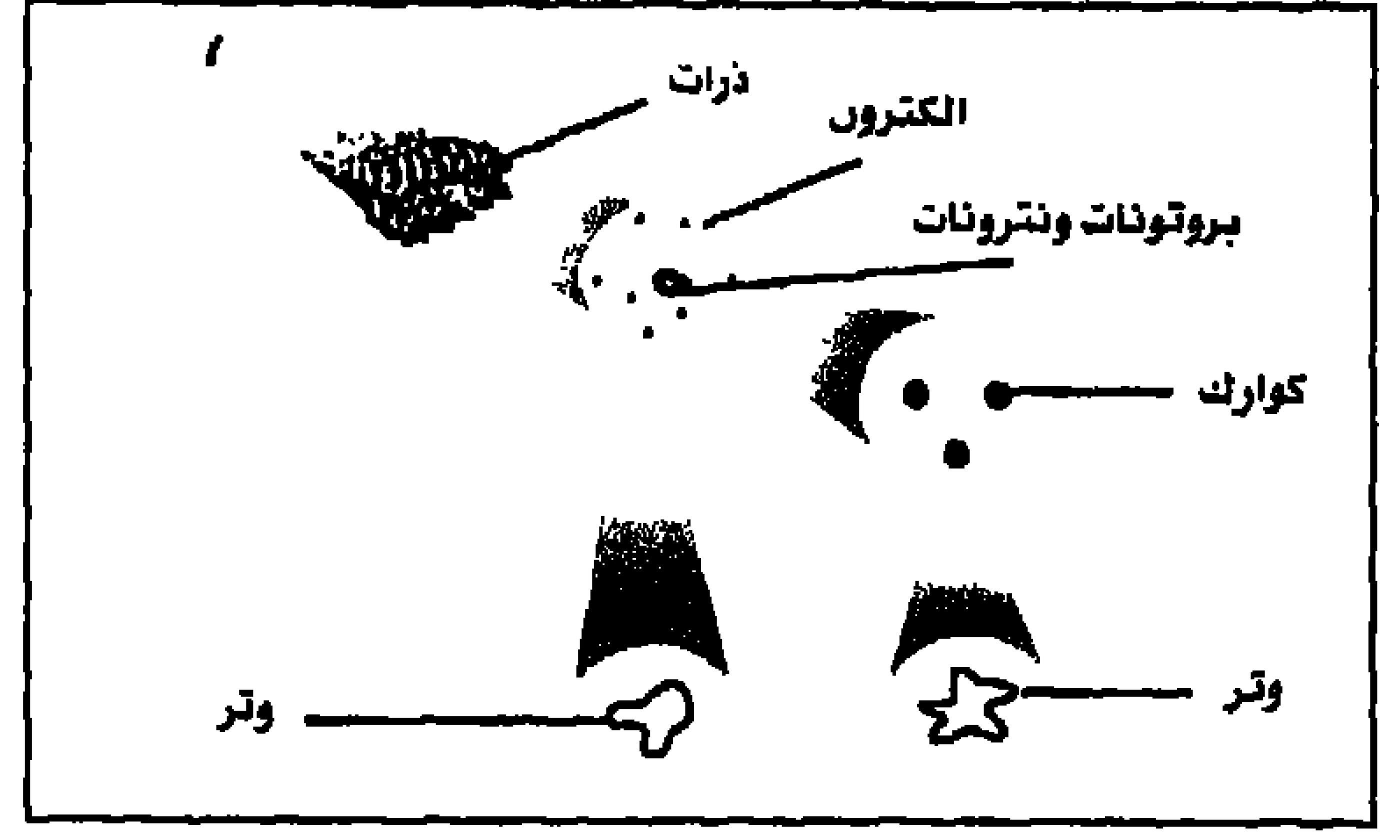
وليس هذا التساؤل سفسطة فلسفية عديمة الجدوى تطرح سبب حدوث بعض الأمور التفصيلية على نحو ما دون سواها؛ فالعالم كان سيبدو مكاناً آخر مختلفاً تماماً لو تغيرت خصائص دقائق المادة والقوة تغيراً طفيفاً عمّا هي عليه. إن وجود النوى المستقرة للعناصر المئة والنيف تقريباً التي يضمها الجدول الدوري والتي يتكون منها كل ما حولنا، يعتمد بصورة أساسية على نسبة شدتي القوتين الشديدة والكهرطيسية؛ فالبروتونات المحشورة في النوى الذرية تتنافر فيما بينها بسبب القوة الكهرطيسية، وتتجاذب بسبب القوى الشديدة المؤثرة بين كواركاتها. ولحسن الحظ فإن هذه القوة تتغلب على قوة التنافر وتبقى البروتونات متراصة ومتماسكة في نوى الذرات. إلاّ أن أي تغيير طفيف في الشدتين النسبيتين لهاتين القوتين سوف يطيح بهذا التوازن مسبباً تحلّل معظم النوى الذرية المستقرة. ولو كانت كتلة الإلكترون أكبر بعدة مرات ممّا هي عليه، لَنَحَتْ الإلكترونات والبروتونات للاتحاد بعضها ببعض مشكّلة النترونات، ولاختفت من الوجود ذرة الهيدروجين (وهي أبسط ذرة كيميائية في نواتها بروتون واحد)، ولأعاق ذلك تشكل العناصر الأخرى الأثقل منها، ومن ثم أعاق تشكل النجوم على الاندماج الحاصل ما بين نوى مستقرة. كما تلعب قوة الثقالة دوراً أساسياً؛ فالأفران النووية التي في قلب النجوم، والتي تسبب توهّجها وتألّقها، تستمد طاقتها من الكثافة العالية للمادة فيها. ولو ازدادت شدة قوة الثقالة لتماسكت المادة في قلب النجم على نحو أكبر، ومن ثَمَّ لازداد معدل التفاعلات النووية التي تجري فيه. وكما يستهلك الضوء الساطع وقوده بأسرع مما تفعله شمعة ذات ضوء خافت، فإن زيادة معدل التفاعلات النووية في نجم ما كالشمس ستكون ذات تأثير مدمر على أشكال الحياة التي نعرفها. وبالمقابل، لو انخفضت شدة الثقالة بصورة محسوسة لما أمكن للمادة أن تتجمع وتتماسك، ولما تكونت النجوم والمجرات.

ونكتفي هنا بتقديم هذه الأمثلة التي هناك الكثير منها. ومعناها ودلالتها واضحان: فالكون صورته التي هو عليها والتي نعرفها لأن لجسيمات المادة والطاقة الخصائص التي لها. ولكن! هل من تفسير علمي لامتلاك هذه الجسيمات تلك الخصائص؟

نظرية الأوتار، وفكرتها الأساسية

تقدم نظرية الأوتار نموذجاً قوياً متماسكاً، يضع أول مرة، إطاراً هيكلياً يسمح بالإجابة عن التساؤلات المطروحة.

وتتجلى الفكرة الأساسية في هذه النظرية في تجاوزها الأفكار السائدة القائلة بأن الوحدات الأساسية المكونة للمادة هي تلك التي يضمها الجدول 1، والتي يبدو أنه ليس لها بنية داخلية أدنى، إذ أن النظرية تقول بأننا لو استطعنا تفحص هذه الجسيمات بدقة عالية جداً تفوق بمراتب الدقة التي تتيحها التقانات المعتمدة في وقتنا الحاضر، لرأينا فيها حلقات صغيرة ذات بعد واحد، أي أن في كل جسيم منها خيطاً دقيقاً قابلاً للاهتزاز مثل حلقة مطاطية رقيقة. وقد أطلق الفيزيائيون، الذين لم تكن لديهم بلاغة غيل مان الأدبية، اسم الوتر على هذا الخيط. تبدو هذه الفكرة على الشكل 1، إذ نرى أننا لو انطلقنا من قطعة بسيطة من المادة، تمثلها تفاحة على الشكل، وعمدنا إلى تضخيم بنيتها وتحرّي مكوناتها لوصلنا فيما بعد البنى المتتالية المعروفة من ذرات إلى كواركات، مروراً بالبروتونات والنترونات والإلكترونات، إلى طبقة مجهرية جديدة تضم هذه الأوتار المهتزة.



الشكل 1: تتكون المادة من ذرات، تتكون بدورها من كواركات وإلكترونات. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن هذه الجسيمات جميعها هي في الحقيقة حلقات Loop صغيرة لوتر مهتز.

وسنرى أن إحلال الأوتار محل النقاط المادية للجسيمات الأساسية سيتيح، ولو على نحو غير بديهي، حلّ التناقض القائم بين ميكانيك الكم والنسبية العامة. فنظرية الأوتار قادرة على حل العقدة الغوردية(*) هذه التي تُعَدُّ المعضلة الرئيسة في الفيزياء النظرية المعاصرة، علماً بأن حل هذه العقدة لم يكن إلاّ واحداً من الأسباب التي جعلت من هذه النظرية محط الاهتمام ومصدر الإثارة.

نظرية الأوتار: النظرية الموحّدة لكل شيء

لم تكن القوتان النوويتان الشديدة والضعيفة معروفتين في أيام آينشتاين. فكان يرى، حتى في وجود قوتين متمايزتين فقط هما قوة الثقالة والقوة الكهرطيسية، أمراً مقلقاً جداً، إذ لم يقبل أن تقوم الطبيعة على "بناء" بمثل هذا الإسراف! ومن هنا بدأت رحلته، عبر السنين الثلاثين الأخيرة من عمره، في البحث عن نظرية "الحقل الموحّد" التي كان يأمل منها أن تقدم البرهان على أن هاتين القوتين ليستا إلاّ مظهرين لمبدأ أساسي واحد. وكان هذا السعي الدينكيشوتي سبباً في انعزال آينشتاين وفي ابتعاده عن عالم الفيزياء الذي كان تبهره وتثير اهتمامه الإمكاناتُ الجديدةُ التي أتى بها ميكانيك الكمّ، فنراه يكتب في رسالة إلى أحد أصدقائه في أوائل الأربعينيات معبراً عن شعوره بهذه العزلة بقوله: **«لقد غدوت رجلاً عجوزاً وحيداً يعرفه الناس لأنه ينسى أن يلبس جواربه، ويعرضونه في مناسباتهم الخاصة كظاهرة مثيرة للفضول».**

أما الحقيقة فهي، وبكل بساطة، أن آينشتاين كان رجلاً سابقاً عصره. لقد انقضى نصف قرن على حلمه بنظرية موحّدة، ولايزال هذا الحلم بعد المعضلة الرئيسة في الفيزياء الحديثة. ويوماً بعد يوم يزداد اعتقاد أعداد كبيرة من الفيزيائيين والرياضياتيين بأن نظرية الأوتار قد تكون هي الحل. فهي، منطلقة من مبدأ واحد يقول بأن كل شيء يتكون في بعده المجهري الأدنى من تجمعات من أوتار مهتزة، تقدم إطاراً واحداً قادراً على تفسير كل خصائص القوى والمادة.

تقول النظرية إن خصائص الجسيمات المبينة في الجدولين 1، و2، ليست إلاّ انعكاساً للطرق المختلفة التي يمكن للوتر أن يهتز بها، وكما أن لأوتار البيانو والكمان تواترات رنينية تميل إلى الاهتزاز وفقها، وهو ما تميزه آذاننا كنغمات موسيقية مختلفة، فإن لحلقات الأوتار أنماطاً اهتزازية لا تبدو كنغمات موسيقية، بل تتجسد على شكل جسيمات يحدد نمطُ الاهتزاز كتلتَها وشحنتَها. فالإلكترون مثلاً هو اهتزاز لوتر بنمط معين، والكوارك العلوي هو اهتزاز بنمط آخر. وهكذا فإن خصائص الجسيمات لم تعد مجموعة معطيات تجريبية عشوائية في ظاهرها، بل غدت تجسيداً لخاصية فيزيائية محدّدة واحدة هي نمط الحلقات الأساسية للوتر، أو بتعبير آخر هي موسيقى هذا الوتر. فكل شيء إذاً سواء أكان مادة أم قوة، غدا موحداً في إطار واحد من اهتزازات الوتر المجهرية، أو من النغمات التي يمكن أن يصدرها هذا الوتر.

وهكذا وضع الفيزيائيون ولأول مرة في تاريخ الفيزياء إطاراً واحداً قادراً على تفسير جميع سمات الكون، ولذلك عُدّت نظرية الأوتار أحياناً بأنها قد تكون **"نظرية كل شيء"** (ن.ك.ش)، أو **النظرية النهائية**. وتعني هذه الأسماء الرنانة أنّ هذه النظرية هي أعمق نظرية في الفيزياء، إذ تضم سائر النظريات الأخرى، وهي لا تحتاج، بل لا تسمح، بوجود فرضيات تفسيرية خارج إطارها. غير أن بعض العاملين في هذه النظرية يعتمدون مقاربة أكثر واقعية، إذ يرونها وبنظرة أكثر تحديداً قادرة على تفسير الخصائص الأساسية للجسيمات وخصائص القوى التي يؤثر فيها بعضها على بعضها الآخر. وقد يدّعي البعض أن هذا ليس تحديداً لأن كل شيء، من حيث المبدأ، من الانفجار الأعظم إلى أحلام اليقظة يمكن وصفه بعمليات فيزيائية أساسية صغيرة تقوم بها المكونات الأساسية للمادة، فإذا ما عرفنا خصائص هذه المكونات (الجسيمات) أمكننا فهم كل شيء.

لكن هذا التوجه الفلسفي الاختزالي ما لبث أن قاد إلى قيام مناقشات ساخنة، إذ وجد البعض أن من السخف والحماقة الادعاء بأن أمور الحياة وعجائب الكون ليست إلاّ نتيجة حركات إيقاعية راقصة تقوم بها جسيمات مجهرية تبعاً لقوانين فيزيائية. فكيف نقبل أن تكون مشاعرنا وأحاسيسنا بالفرح والحزن والملل ليست إلاّ نتيجة تفاعلات كيميائية تقوم بها في أدمغتنا، جزيئات وذرات، تقتضي بدورها، وعلى مستوى مجهري أدنى، تفاعلات تقوم بها بعض الجسيمات المذكورة في الجدول 1، والتي ليست في النهاية سوى أوتار مهتزة. وكرّد على هذا الاتجاه في النقد نورد ما قاله ستيفن واينبرغ، الحائز جائزة نوبل، في كتابه **أحلام حول نظرية نهائية:**

وهناك على الجانب الآخر أولئك الذين يعارضون الاتجاه الاختزالي والذين ترعبهم الصورة القاتمة للعلم الحديث، إذ

(*) عقدة أحكم شدّها غورديوس ملك فريجيا. وقد زعموا أنه لن يحلّها إلاّ سيد آسيا المقبل، فجاء الإسكندر الكبير وقطعها بسيفه. المترجم

يشعرون بضآلة هذا الذي يرجع في نهايته إلى مجرد جسيمات مادية وحقول قوى وما يمكن أن يقوم بينها من تأثيرات متبادلة. لن أحاول الرد على هذه الانتقادات بخطاب بليغ يتحدث عن جماليات العلم الحديث بل سأكتفي بالقول بأن العالم الاختزالي بارد ومجرد من العواطف، ولكن يجب أن نقبله على ما هو عليه، لا لأننا نريده كذلك، بل وبكل بساطة لأنه هو كذلك.

وقد يقبل البعض هذا الرأي، وقد لا يقبله البعض الآخر.

وكما حاول آخرون أن يبرهنوا على أن تطورات جديدة من مثل نظرية الشواش تتطلب تدخّل أنواع جديدة من القوانين عندما تزداد درجة تعقيد النظام أو الجملة الفيزيائية. ففهم سلوك الإلكترون أو الكوارك شيء وتطبيقه لفهم سلوك عاصفة هوجاء شيء آخر. ويتفق معظم العلماء في ذلك ويختلفون فيما هو بعده. فهل هذه الظواهر الغريبة التي لا يمكن التنبؤ بها، والتي تحدث في نظم أكثر تعقيداً بكثير من مجرد جسيمات منفردة، تعبّر عن مبادئ وقوانين فيزيائية جديدة، أم أن القوانين التي تحكمها مشتقة، ولو بطريقة معقدة جداً، من قوانين الفيزياء التي تحكم العدد الكبير من المكونات العنصرية. أما أنا فلا أشعر أنها تعبّر عن قوانين فيزيائية جديدة ومستقلة. وأرى أن صعوبة تفسير سلوك عاصفة هوجاء، انطلاقاً من فهم فيزياء الإلكترونات والكواركات إنما يرجع إلى مشكلة تقتضيها الحسابات الضخمة اللازمة، ولا أرى فيها دليلاً على حاجتنا إلى قوانين فيزيائية جديدة. وهناك من يعارض هذا الرأي أيضاً.

وما أود التركيز عليه، وهو خارج نطاق هذا الجدل، أنه، حتى ولو قبلنا وجهة النظر الاختزالية المختلف عليها، فإن المبدأ النظري شيء ونقله إلى حيز التطبيق شيء آخر. فمعظم العلماء يتفقون على أن نظرية كل شيء لا تعني في حال وجودها، أن علوم الكيمياء والبيولوجيا والجيولوجيا وعلم النفس وحتى علم الفيزياء، قد بلغت غايتها وحلّت ألغازها. إن الكون على درجة كبيرة من الغنى والتعقيد بحيث أن اكتشاف هذه النظرية، بالمعنى الذي تحدثنا عنه سابقاً، لا يعني نهاية العلم، بل على العكس من ذلك تماماً. إن اكتشاف هذه النظرية، أو التوصل إلى التفسير النهائي للكون على مستواه المجهري الأدنى وعن طريق نظرية لا تحتاج إلى أية فرضيات إضافية، سيزودنا بالأسس المتينة التي يمكن أن نبني عليها فهمنا للكون. إن هذا الاكتشاف سيكون نقطة البداية وليس نقطة النهاية، إذ ستقدم هذه النظرية دعامات التناسق الدائم الذي يؤكد أن عالمنا قابل للفهم والإدراك.

الحالة الراهنة لنظرية الأوتار:

يهدف هذا الكتاب بصورة أساسية إلى تفسير ماهية الكون وفقاً لنظرية الأوتار مع التركيز بوجه رئيس على ما لذلك من نتائج على فهمنا للزمان والمكان. إلاّ أن مادته، وبخلاف الكثير مما كتب ويكتب عن الإنجازات والتطورات العلمية، ليست نظرية مكتملة أثبتتها التجربة وقبل بها الفيزيائيون كافة، لأن نظرية الأوتار تتضمن بناءً رياضيّاتياً نظرياً معقداً لم يُتمكن حتى الآن من سبر أغواره تماماً، رغم ما تحقق من تقدم هائل خلال العشرين سنة الماضية.

وهكذا يجب أن يُنظر إلى نظرية الأوتار كنظرية واعدة لاتزال قيد البناء، كشفت لنا حتى الآن، عن طريق فهمنا الجزئي لها، الكثيرَ من أسرار الطبيعة وبنية المادة والمكان والزمان. ويتجلى أحد نجاحاتها الكبرى في صياغتها للنسبية العامة والميكانيك الكمي ضمن بناء واحد متناسق. كما أنها قادرة، خلافاً للنظريات السابقة، على الإجابة عن أسئلة جوهرية تدور حول ماهية المكونات الأساسية للمادة والقوى. وعلى الدرجة ذاتها من الأهمية، يكمن الجمال الرياضياتي للبناء النظري للأجوبة التي تقدمها النظرية، على الرغم من صعوبة نقل الصورة الأنيقة لذلك. فكثير من ظواهر الطبيعة، كالخصائص الفيزيائية للجسيمات الأساسية وعددها، والتي نقبلها عادة قبولاً قد يبدو عشوائياً، إنما ينجم كنتيجة منطقية للبناء الهندسي للكون وفقاً لنظرية الأوتار. وإذا كانت هذه النظرية صحيحة فإن بنية الكون على المستوى المجهري تتألف من نسيج معقد متعدد الأبعاد تهتز الأوتار فيه وتتلوى بصورة دائمة؛ وبدلاً من أن تبدو الخصائص الفيزيائية للمكونات الأساسية عشوائية، فإنها تغدو مرتبطة بطراز بناء هذا النسيج. وستكون التجربة في نهاية المطاف هي البرهان الأخير والقاطع على صحة نظرية الأوتار، ولن يغني جمالها الرياضيّاتي عن ضرورة قدرتها على التنبؤ بأمور فيزيائية قابلة للاختبار، إن كانت حقاً هي النظرية النهائية التي ستكشف أسرار الكون.

ولانزال الآن بعيدين عن هذا الهدف، وقد يمر وقت طويل قبل أن نتمكن من تحقيقه، مع أن الاختبارات التي ستجرى خلال السنوات العشر القادمة، قد تقدم دليلاً عرضياً غير مباشر على صحة النظرية. وبالإضافة إلى ذلك فإن نظرية الأوتار استطاعت مؤخراً حلّ معضلة بقيت دون حلّ مدة تزيد على الخمس والعشرين سنة، وتخص ما يسمى "**أنتروبية ــ بيكنشتاين ــ هوكينغ للثقب الأسود**". وقد أقنع نجاحها في ذلك كثيراً من الفيزيائيين أنها ستقدم، مع اكتمال صياغتها، الصورة المطلوبة لفهم كيفية عمل النظام الكوني.

ويلخص إدوار ويتن، وهو واحد من ألمع روّاد هذه النظرية وخبرائها، حالتها الراهنة بقوله: **إن نظرية الأوتار هي جزء من فيزياء القرن الحادي والعشرين، أتت بالمصادفة في القرن العشرين**"، وهذا ما كان عبّر عنه الفيزيائي الإيطالي الشهير دانيال أماتي. يبدو الوضع كما لو أن فيزيائيي القرن التاسع عشر قد زُوّدوا بحاسوب فائق، مما نعرفه اليوم، دون إعطائهم تعليمات تشغيله، إذ كانت ستتبدّى لهم عن طريق التجربة والخطأ دلالات تشير إلى مدى قدرة هذا الحاسوب، وكان سيلزمهم وقت طويل حتى يتمكنوا من فهمه والسيطرة عليه. ولا تقف المقارنة عند هذا الحد، إذ وكما كانت تلك الدلالات عن قدرة الحاسوب ستعدّ حافزاً يدفع أولئك الفيزيائيين

إلى محاولة الإلمام بأسراره، فإن ما لمحناه حتى الآن من قوة نظرية الأوتار سوف يحفز جيلاً بأكمله من فيزيائيي اليوم على دراسة نظرية الأوتار ومحاولة فهمها والإلمام بتقنياتها.

تدل ملاحظة ويتن السابقة، بالإضافة إلى ملاحظات مماثلة قدمها خبراء آخرون في نظرية الأوتار، على أنه قد تمر عقود أو قرون قبل أن تكتمل صياغة النظرية ويتم استيعابها وفهمها. وقد يكون ذلك صحيحاً، فالرياضيات التي تستخدمها النظرية معقدة جداً بحيث أنه لا يُعرف حتى الآن الشكل الصحيح لمعادلاتها، بل تعرف أشكال تقريبية لها، وهي بدورها معقدة جداً بحيث لا تعرف لها إلاّ حلولٌ جزئية. إلاّ أن ذلك لا يمنعنا من الإقرار بأن خروقات علمية ملهمة هائلة قد تحققت خلال النصف الثاني من حقبة التسعينيات، وهذا ما سمح بمعالجة مسائل نظرية فائقة الصعوبة. وقد يعني ذلك أن نهاية المطاف، لفهم نظرية الأوتار بصورة كمية، أكثر قرباً مما كان يُظن في البداية، إذ يطور الفيزيائيون اليوم في كل أرجاء العالم تقنيات رياضيّاتية جديدة وقوية تتفوق على التقنيات التقريبية الكثيرة المستعملة سابقاً، وتتضافر جهودهم بمعدل سريع في محاولة لمّ شمل العناصر المتفرقة لبناء نظرية الأوتار وتجميعها.

تُعدّ هذه التطورات اليوم فرصةً مؤاتية مذهلة لإعادة تفسير كثير من المفاهيم الأساسية لنظرية الأوتار والتي مضى على وضعها بعض الوقت. وقد يتساءل المرء مثلاً عند رؤية الشكل 1: لماذا الأوتار؟ لماذا لا تكون المكونات الأساسية أقراصاً صغيرة، أو شذرات فقاعية مجهرية، أو مزيجاً من الاثنين؟ فقد أظهرت التطورات الأخيرة أن هذه الأنواع الأخرى من المكونات تلعب فعلاً دوراً مهماً في الأوتار، وأنها بيّنت أن هذه النظرية هي في الواقع جزء من نظرية أعم وأشمل توضع الآن، وتسمى، لأسباب غامضة، نظرية الـ M (النظرية الأم).

وليست مسيرة العلم في تقدمه مسيرة منتظمة ومطردة، بل نراه عبرها بدورات وقفزات. فقد تزخر بعض الفترات الزمنية باكتشافات علمية كثيرة ومثيرة، في حين تنقضي بعض هذه الفترات دون كشوف تذكر. ويعرض الفيزيائيون نتائج أبحاثهم النظرية والتجريبية أمام حشود من زملائهم لمناقشتها والتحاور حولها؛ وقد يُستبعد بعضها أحياناً كما قد يعدّل بعضها الآخر، إلاّ أن بعض هذه النتائج يعد نقاط انطلاق ملهمة لطرق جديدة أكثر دقة من سابقاتها لفهم فيزياء الكون. أو نقول بتعبير آخر أن طريق التقدم العلمي نحو غايته المنشودة لفهم الحقيقة الفيزيائية مليء بالتعرجات والانعطافات. وفي حين تُعرف بداية هذا الطريق من المحاولات التي بدأها الإنسان لسبر أغوار الكون، إلا أنه لا يمكن معرفة نهايته. وقد تكون نظرية الأوتار محطة عرضية على هذا الطريق، وقد تكون علامة بارزة تدل على منعطف أساسي فيه، وربما تكون هي نهاية المطاف التي يُسعى إليها. وأياً كان الأمر فقد بيّنت الأبحاث التي أنجزها مئات الفيزيائيين والرياضياتيين في بلدان متعددة من القرن العشرين أننا على الدرب الصحيح، وقد نكون في المرحلة الأخير منه.

إن فهمنا الجزئي الحالي لما قدمته نظرية الأوتار من صور رائعة عن الكون يُعدّ دلالة بليغة على قوة هذه النظرية وعلى غناها، وسيكون الدور الرئيس، فيما سيأتي، للتطورات العلمية التي تكمل القفزة الثورية في فهمنا للزمان والمكان الذي بدأ مع نظريتي آينشتاين في النسبية الخاصة والعامة. وسنرى، إن صحت هذه النظرية، أن نسيج عالمنا من الخصائص العجيبة ما كان سيدهش آينشتاين نفسه لو كان حياً.



يجدّ الفيزيائيون في البحث عن جسيم مراوغ يمكنه أن يكشف عن وجود نوع جديد من الحقول (حقل هيگز) ينتشر في الوجود المادي كله فوجود هذا الحقل سيوفر فهما أكمل عن الكيفية التي يعمل بها الكون.

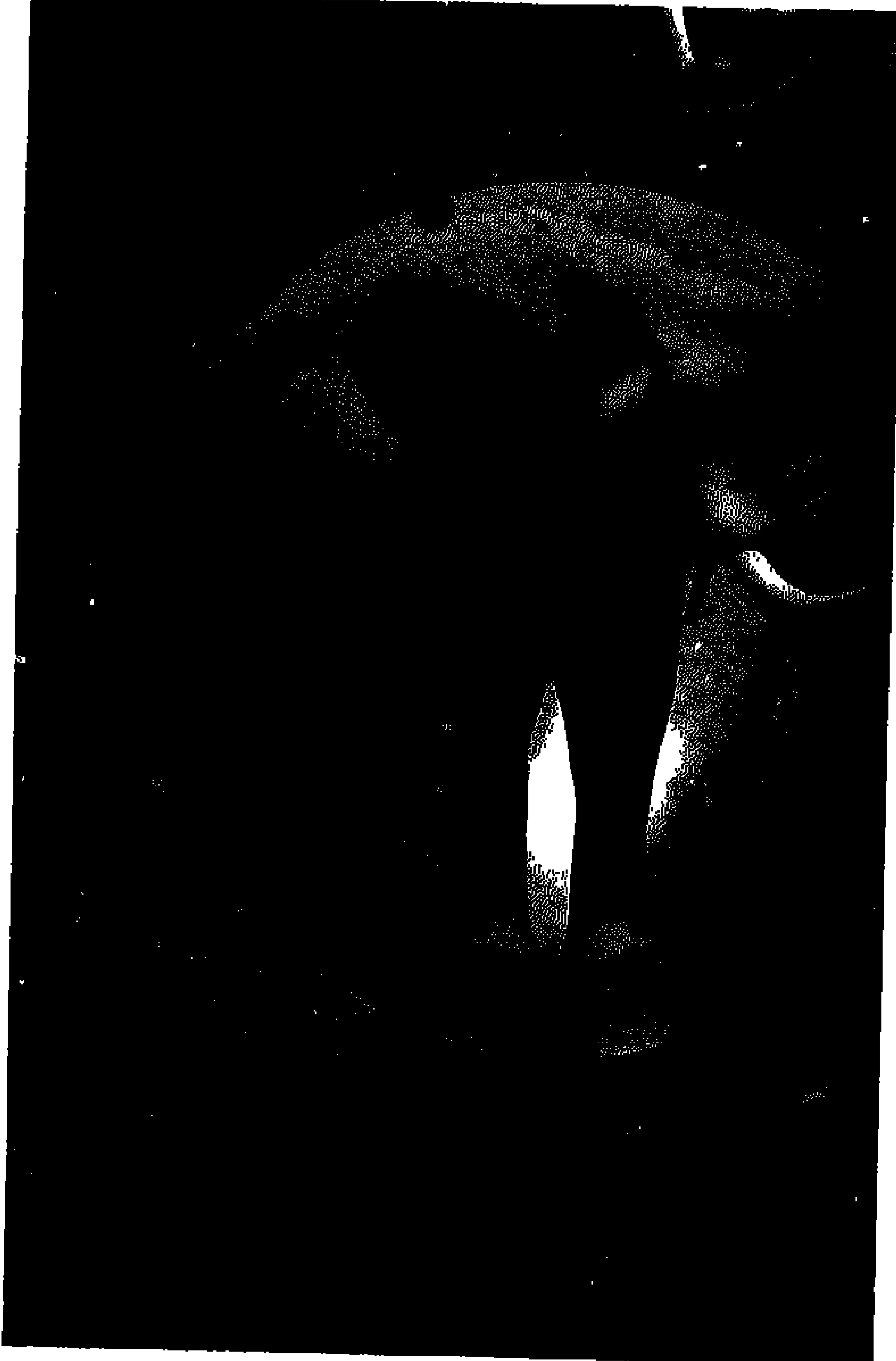
(ج. كين)

يعتقد معظم الناس أنهم يعرفون ما هي الكتلة، لكنهم لا يدركون سوى جزء من الحكاية. فالفيل، على سبيل المثال، أكبر كثيراً من النملة حجماً ووزناً. وحتى في غياب الثقالة، تبقى كتلة الفيل أكبر — فدفعه أو تحريكه أصعب. ومن الواضح أن الفيل أكبر كتلة لأنه مؤلف من عدد من الذرات أكبر كثيراً مما في النملة، ولكن ما الذي يحدد كتلة كل من الذرات المنفردة؟ وماذا عن الجسيمات الأولية التي تشكل الذرات — ما الذي يحدد كتلها؟ وبالفعل لماذا يكون لها كتلة أصلاً؟

وهكذا نرى أن لمسألة الكتلة وجهين مستقلين. أولاً، يلزم أن نعرف كيف تنشأ الكتلة أصلاً. يبدو أن الكتلة تنتج من ثلاث آليات مختلفة على الأقل، وهي التي سوف أصفها فيما يلي. إن أحد العوامل الأساسية في النظريات التلمّسية (التجريبية) tentative theories للفيزيائيين حول الكتلة هو نوع جديد من الحقول ينتشر في الوجود المادي كله، يدعى حقل هيگز Higgs field. ويُعتقد أن كتل الجسيمات الأولية تأتي من التآثر مع حقل هيگز فإذا كان حقل هيگز موجوداً بالفعل فإن النظرية تتطلب أن يكون له جسيم مرفق به، هو **بوزون هيگز** Higgs boson. ويحاول العلماء حالياً، باستخدام **مسرّعات الجسيمات** particle accelerators، العثور على هذا البوزون.

والوجه الثاني هو أن العلماء يريدون أن يعرفوا لماذا تمتلك مختلف أنواع الجسيمات الأولية مقادير كتلة خاصة بها تغطي مدى يبلغ 10^{11} ضعفاً على الأقل، ولكننا مازلنا لا نعرف سبباً لذلك *[انظر الشكل في الصفحة 33]*. وعلى سبيل المقارنة، فإن كتلة الفيل تفوق كتلة أصغر نملة بنحو 10^{11} ضعفاً.

لقد أدركوا أن العلم ينبغي أن يبدأ أولاً بوصف كيفية سير الأمور، ثم بفهم السبب بعد ذلك. وفي السنوات الأخيرة، على أية حال، أصبح «سبب» الكتلة موضوع بحث في علم الفيزياء. ففَهم معنى الكتلة وأصولها سوف يكمل **النموذج العياري** Standard Model لفيزياء الجسيمات ويوسعه. هذا النموذج هو النظرية المعترف بها والتي تصف الجسيمات الأولية المعروفة وتآثراتها. كما أن هذا الفهم سوف يحل ألغازاً مثل المادة الخفية التي تشكل نحو 25 في المئة من الكون.



كتلة الفيل الإفريقي الذّكر (نحو 6000 كيلوغرام) تفوق كتلة أصغر أنواع النمل (0.01 مليغرام) بأكثر من 10^{11} ضعفاً، وهذا تقريباً هو الفرق نفسه بين الكوارك الذروي والنيوترينو. أما لماذا يجب على كتل الجسيمات أن يختلف بعضها عن بعض بمثل هذا القدر الكبير فيبقى لغزاً.

ما هي الكتلة؟(**)

قدم (إسحق نيوتن) أول تعريف علمي للكتلة في عام 1687 في مؤلفه الشهير «المبادئ» principia: «إن كمية المادة هي قياس هذه الكمية الناشئة عن كثافتها وحجمها معاً». وكان ذلك التعريف الأساسي جداً كافياً تماماً لـ (نيوتن) وللعلماء الآخرين لمدة تزيد على 200 سنة.

(*) العنوان الأصلي: THE MYSTERIES OF MASS

(**) what is Mass?

إن أساس فهمنا الحديث للكتلة أعقد بكثير من تعريف (نيوتن)، وهو يستند إلى النموذج العياري. ففي قلب هذا النموذج توجد دالة رياضياتية تدعى «لاگرانجيان» Lagrangian هي التي تمثل كيف تتأثر الجسيمات المختلفة. ويستطيع الفيزيائيون انطلاقاً من هذه الدالة، وباتباع القواعد المعروفة باسم النظرية الكمومية النسبوية[1]، أن يحسبوا سلوك الجسيمات الأولية، بما في ذلك كيفية تجمعها لتشكل جسيمات مركبة مثل البروتونات. ونستطيع بعدئذ أن نحسب كيف تستجيب الجسيمات، الأولية منها والمركّبة، للقوى. فبالنسبة إلى قوة معينة F يمكن أن نكتب معادلة (نيوتن) على الصورة $F = ma$ التي تربط بين القوة والكتلة والتسارع الناتج. وتنبئنا دالة لاگرانجيان في معرفة ماذا نستخدم من أجل m هنا، وهذا هو المقصود بكتلة الجسيم.

لكن الكتلة، كما نفهمها عادة، تظهر بوضوح في أكثر من مجرد العلاقة $F = ma$. فنظرية النسبية الخاصة لـ (آينشتاين) على سبيل المثال، تتنبأ بأن الجسيمات المعدومة الكتلة تسير في الخلاء بسرعة الضوء وأن الجسيمات ذات الكتلة تسير أبطأ كثيراً من ذلك بصورة يمكن معها حساب سرعتها إذا عرفنا كتلتها. كما تتنبأ قوانين الثقالة بأن الثقالة تؤثر في الكتلة وفي الطاقة أيضاً بصورة محددة تماماً. والكمية m المستنتجة من دالة لاگرانجيان لكل جسيم تسلك سلوكاً صحيحاً وفق أي من هذه الطرق؛ تماماً كما نتوقع بالنسبة إلى كتلة معينة.

إن للجسيمات الأساسية كتلاً ذاتية تُعرف باسم **الكتلة السكونية** rest mass (أما تلك الجسيمات التي كتلها السكونية تساوي صفراً فتدعى **جسيمات معدومة كتلة** massless). وبالنسبة إلى الجسيمات المركّبة فإن الكتلة السكونية للمكوّنات، وكذلك طاقتها الحركية والطاقة الكامنة لتأثراتها تسهم جميعها في كتلة الجسيم الكلية. ذلك أن الطاقة والكتلة مرتبطتان حسب معادلة (آينشتاين) الشهيرة $E = mc^2$ (الطاقة تساوي جداء الكتلة في مربع سرعة الضوء).

وكمثال على الطاقة التي تسهم في الكتلة ما يحدث في أكثر أنواع المادة انتشاراً في الكون ــ البروتونات والنيوترونات التي تشكل النوى الذرية في النجوم والكواكب والناس وفي كل ما نراه. تشكل هذه الجسيمات من 4 إلى 5 في المئة من الكتلة – الطاقة في الكون [*انظر الإطار في الصفحة 960*]. ويدلنا النموذج العياري على أن البروتونات والنيوترونات مؤلفة من جسيمات أولية تدعى **كواركات** quarks، وهذه يرتبط بعضها ببعض بوساطة جسيمات معدومة الكتلة تدعى **گلوونات** gluons. وعلى الرغم من أن المكونات تدور وتلف داخل كل بروتون، فإننا نرى البروتون من الخارج جسيماً متسقاً ذا كتلة ذاتية تُعطى بوساطة حاصل جمع كتل وطاقات مكوناته.

ويتيح لنا النموذج العياري أن نجد بالحساب أن الكتلة الكلية تقريباً للبروتونات والنيوترونات تأتي من الطاقة الحركية للكواركات والگلوونات المكونة لها (والباقي يأتي من الكتلة السكونية للكواركات). وهكذا فإن بين 4 و 5 في المئة من الكون كله ــ أي كل المادة المعروفة من حولنا تقريباً ــ تأتي من طاقة حركة الكواركات والگلوونات في البروتونات والنيوترونات.

آلية هيگز(*)

إن الجسيمات الأولية فعلاً ــ مثل الكواركات والإلكترونات، بخلاف البروتونات والنيوترونات ــ ليست مؤلفة من أجزاء أصغر منها. وتفسير كيفية وجود كتلة لها يمسّ اللبّ من مسألة أصل الكتلة. وكما ذكرت آنفاً، فإن التفسير الذي تقترحه الفيزياء النظرية المعاصرة يقضي بأن كتل الجسيمات الأولية تنشأ عن تأثرات مع حقل هيگز. ولكن لماذا يوجد حقل هيگز خلال الكون كله؟ ولماذا لا تساوي شدته الصفر أساساً على المستوى الكوني، شأنه في ذلك شأن الحقل الكهرمغنطيسي؟ وما هي حقيقة حقل هيگز؟

إن حقل هيگز هو حقل كمومي. قد يبدو هذا غامضاً، لكن الحقيقة هي أن جميع الجسيمات الأولية تنشأ على شكل كمّات (كمومات) عن حقل كمومي مناظر. والحقل الكهرمغنطيسي هو أيضاً حقل كمومي (جسيمه الأولي المناظر هو الفوتون). وهكذا في هذا الخصوص، لا يشكل حقل هيگز لغزاً أكثر مما تشكله الإلكترونات أو الضوء، لكنه يختلف، على أية حال، عن جميع الحقول الكمومية الأخرى بثلاث طرق حاسمة.

الاختلاف الأول تقني بعض الشيء. فلجميع الحقول خاصية تدعى سبين spin، وهي كمية ذاتية للاندفاع الزاوي angular momentum يحملها كل من جسيماتها. فجسيمات مثل الإلكترونات لها سبين مقداره ½، ومعظم الجسيمات المرفقة بقوة ما، مثل الفوتون، لها سبين 1. أما بوزونات هيگز (وهي جسيمات حقل هيگز) فلها سبين 0. ووجود هذا الأخير (سبين 0) يمكّن حقل هيگز من الظهور في دالة لاگرانجيان بطرق تختلف عنها بالنسبة إلى الجسيمات الأخرى، وهذا بدوره يتيح ــ ويؤدي إلى ــ خاصتيه الأخريين المميزتين له.

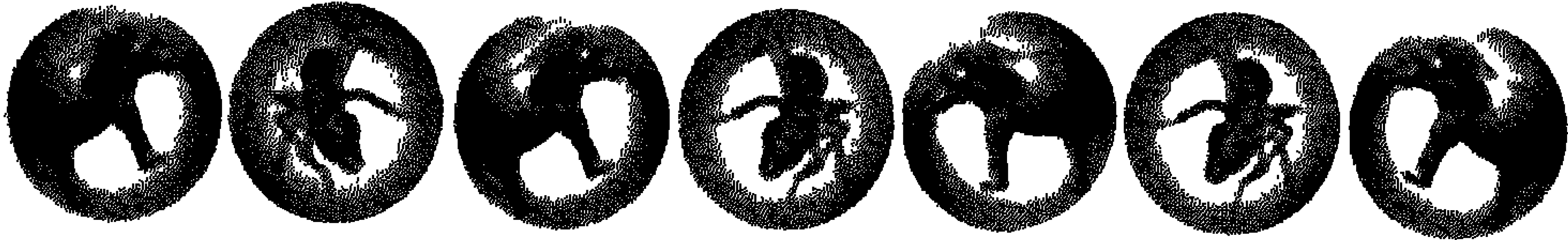
تفسر الخاصية الثانية الفريدة لحقل هيگز كيف أن شدته ليست صفراً في جميع أنحاء الكون، وتوضح سبب ذلك. فكل منظومة، بما في ذلك الكون، تهوي إلى حالة الطاقة الدنيا لها، مثل كرة تتدحرج نازلة إلى قاع الوادي. وبالنسبة إلى الحقول المألوفة، مثل الحقول الكهرمغنطيسية التي توفر لنا البث الإذاعي، تكون حالة الطاقة الدنيا هي تلك التي تكون فيها الحقول معدومة القيمة (أي حين تتلاشى الحقول) ــ إذا أدخل أي حقل غير معدوم فإن الطاقة المختزنة في الحقول تُزيد الطاقة الصافية للمنظومة. لكن طاقة الكون، في حالة حقل هيگز، تكون أقل إذا لم يكن الحقل معدوماً بل كانت له قيمة ثابتة مختلفة عن الصفر. وبلغة التشبيه بالوادي مجازاً يكون أسفل الوادي بالنسبة إلى الحقول العادية في

(1) relativistic quantum theory

(*) The Higgs Mechanism.

الموضع الذي يكون فيه الحقل معدوماً. أما بالنسبة إلى حقل هيگز فتكون للوادي هضبة صغيرة في مركزه (حيث ينعدم الحقل) وأخفض نقطة في الوادي تشكل دائرة حول الهضبة *[انظر المؤطر في الصفحة التالية]*. والكون، مثله مثل كرة، يستقر في مكان ما في هذا الخندق الدائري الذي يقابل قيمة غير معدومة للحقل. أي إن الكون، في حالته الطبيعية ذات الطاقة الأكثر انخفاضاً، ينتشر فيه حقل هيگز غير معدوم.

تعطي كذلك بعض (ولكن ليس جميع) الكتلة للقرائن الفائقة. وتنشأ عن حقليْ هيگز خمسة أنواع من بوزونات هيگز: ثلاثة منها متعادلة كهربائياً واثنان مشحونان. ومن الممكن لكتل الجسيمات المدعوة نيوترينوهات neutrinos، وهي كتل صغيرة جداً مقارنة بكتل الجسيمات الأخرى، أن تنشأ بصورة غير مباشرة غالباً عن هذه التآثرات، أو عن نوع ثالث آخر من حقول هيگز.



والصفة الأخيرة المميزة لحقل هيگز هي شكل تآثراته مع الجسيمات الأخرى. فالجسيمات التي تتآثر مع حقل هيگز تسلك كما لو أن لها كتلة متناسبة مع حاصل ضرب شدة الحقل في شدة التآثر. وتنشأ الكتل عن حدود دالة لاگرانجيان التي تكون فيها الجسيمات متآثرة مع حقل هيگز.

لايزال فهمنا لكل هذا غير كامل على كل حال، ولسنا متأكدين من عدد أنواع حقول هيگز الموجودة. ومع أن النموذج العياري لا يتطلب سوى حقل هيگز واحد لتوليد كتل جميع الجسيمات الأولية، إلا أن الفيزيائيين يعلمون أنه ينبغي أن تحل محل النموذج العياري نظرية أكثر كمالاً. والنظريات الرئيسية المنافسة، وهي امتدادات للنموذج العياري، تدعى **النماذج العيارية الفائقة التماثل** Supersymmetric Standard Models (واختصاراً SSMs). يكون لكل جسيم من النموذج العياري في هذه النماذج ما يسمى **بالقرين الفائق** superpartner (لم يكتشف بعد) له خصائص مشابهة جداً[2]. ويحتاج الأمر في النموذج العياري الفائق التماثل إلى نوعين مختلفين على الأقل من حقول هيگز. والتآثرات مع هذين الحقلين هي التي تعطي كتلة لجسيمات النموذج العياري، وهي

نظرة إجمالية/فيزياء هيگز(*)

- تبدو الكتلة خاصية عادية من خصائص المادة ولكنها في الواقع غامضة بالنسبة إلى العلماء من عدة نواح: أولاً كيف تكتسب الجسيمات الأولية كتلة، ثم لماذا يكون لها هذه الكتل؟
- سوف تساعد الأجوبة عن هذه الأسئلة النظريين على استكمال النموذج العياري لفيزياء الجسيمات وتوسيعه، هذا النموذج الذي يصف الفيزياء التي تحكم الكون. ويمكن للنموذج العياري الموسع أن يساعد أيضاً على حل أحجية المادة الخفية التي تشكل نحو 25 في المئة من الكون.
- تقضي النظريات بأن الجسيمات الأولية تكتسب كتلة بوساطة التآثر مع حقل كمومي ينتشر في الوجود المادي كله. ويمكن للتجارب التي تجرى في مسرِّعات الجسيمات أن تكشف قريباً الدليل المباشر على وجود هذا الحقل الذي يسمى حقل هيگز.

(*) overview / Higgs physics.

(2) [انظر: "The Dawn of physics beyond the Standard Model," by Gordon Kane; Scientific American, june 2003].

توجد لدى النظريين عدة أسباب تجعلهم يتوقعون أن تكون صورة النموذج العياري الفائق التماثل SSM حول تآثر هيگز هي صورة صحيحة. أولاً، من دون آلية هيگز، سيكون البوزونان W وZ، وهما اللذان ينقلان القوة الضعيفة، معدومي الكتلة مثلهما مثل الفوتون (الذي يتعلقان به)، وسيكون التآثر الضعيف في مثل قوة التآثر الكهرمغنطيسي. وتبين النظرية أن آلية هيگز تمنح كتلة للبوزونين W و Z بطريقة خاصة جداً. وقد أُثبتت تجريبياً تنبؤات تلك المقاربة (مثل النسبة بين كتلتي W وZ).

ثانياً، لقد اختُبرت جميع أوجه النموذج العياري اختباراً جيداً، ومن العسير تغيير جزء من هذه النظرية المفصلة المتشابكة (مثل الهيگز) من دون أن يؤثر ذلك في بقيتها. فعلى سبيل المثال، قاد تحليل القياسات الدقيقة لخواص البوزونين W وZ إلى التنبؤ الصحيح بكتلة الكوارك الذروي top quark قبل إنتاج هذا الكوارك بصورة مباشرة، وسوف يفسد تغيير آلية هيگز ذلك التنبؤ وتنبؤات أخرى ناجحة.

ثالثاً، تنجح آلية هيگز في النموذج العياري نجاحاً تاماً في إعطاء كتلة لجميع جسيمات النموذج العياري، وللبوزونين W وZ، وكذلك للكواركات وللبتونات leptons، في حين تفشل المقترحات البديلة عادة في ذلك. ثم إن النظرية SSM، بخلاف النظريات الأخرى، توفر إطاراً لتوحيد فهمنا لقوى الطبيعة. وأخيراً فإن بإمكان النظرية SSM أن تفسر لماذا يكون «وادي» الطاقة الخاص بالكون بالشكل الذي تتطلبه آلية هيگز. ففي النموذج العياري الأساسي ينبغي وضع شكل الوادي كفرضية، أما في النظرية SSM فيمكن استنتاج ذلك الشكل بطريقة رياضياتية.

اختبار النظرية(*)

من الطبيعي أن يرغب الفيزيائيون في إجراء اختبارات مباشرة لفكرة أن الكتلة تنشأ عن التآثرات مع حقول هيگز المختلفة. وبإمكاننا اختبار ثلاث سمات دليلية. أولاً، بإمكاننا البحث عن الجسيمات المميزة المدعوة بوزونات هيگز. فهذه الكمّات quanta يجب أن تكون موجودة وإلا كان التفسير غير صحيح. ويبحث الفيزيائيون حالياً عن بوزونات هيگز في المصادم تيڤاترون Tevatron Collider بمختبر مسرّع فيرمي الوطني في باتاڤيا بولاية إلينوي.

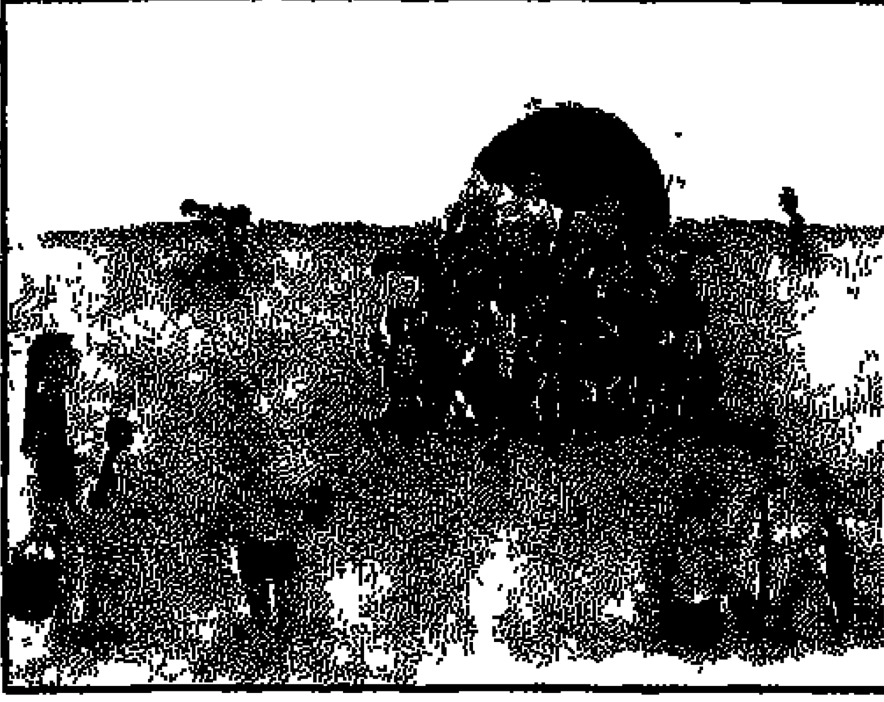
(*) Testing the Theory

خصائص حقل هيكز المراوغ(*)

كيف يولِّد حقل هيكز الكتلة

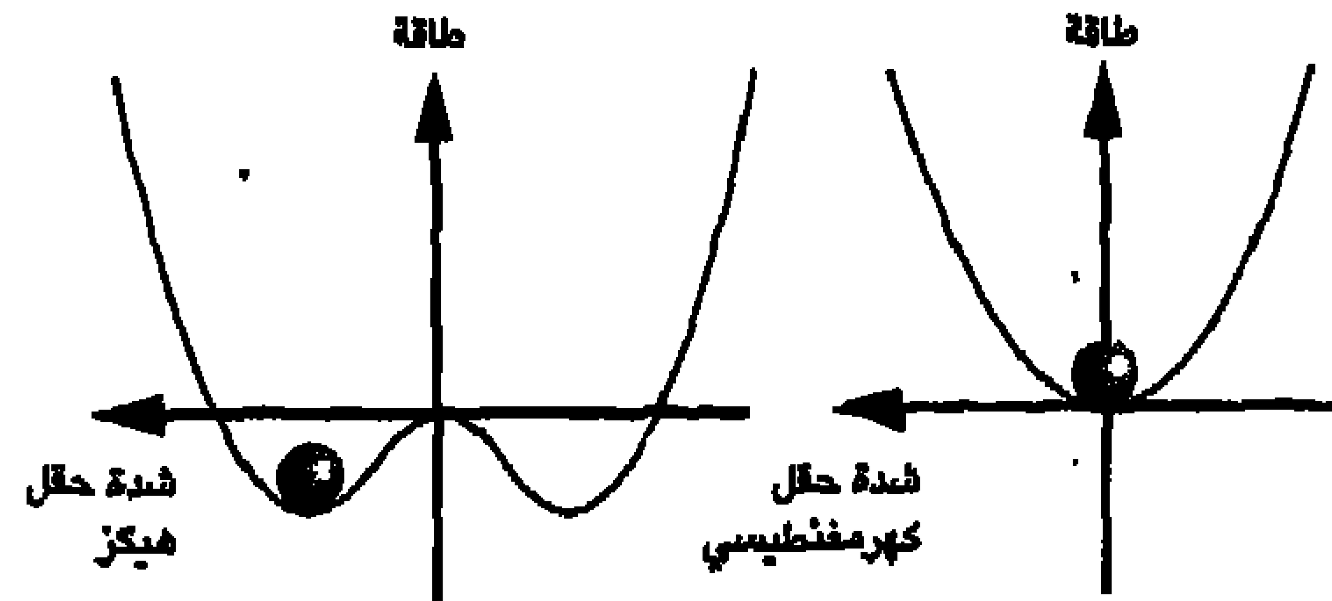

يشبه الفضاء «الخالي» المملوء بحقل هيكز شاطئًا ممتلئًا بالأطفال.


ويشبه الجسيم الذي يعبر تلك المنطقة الفضاء بائع المثلجات الذي يصل ...


... ويتآثر مع الأطفال الذين يبطئون سيره ـ كما لو أنه يكتسب «كتلة».

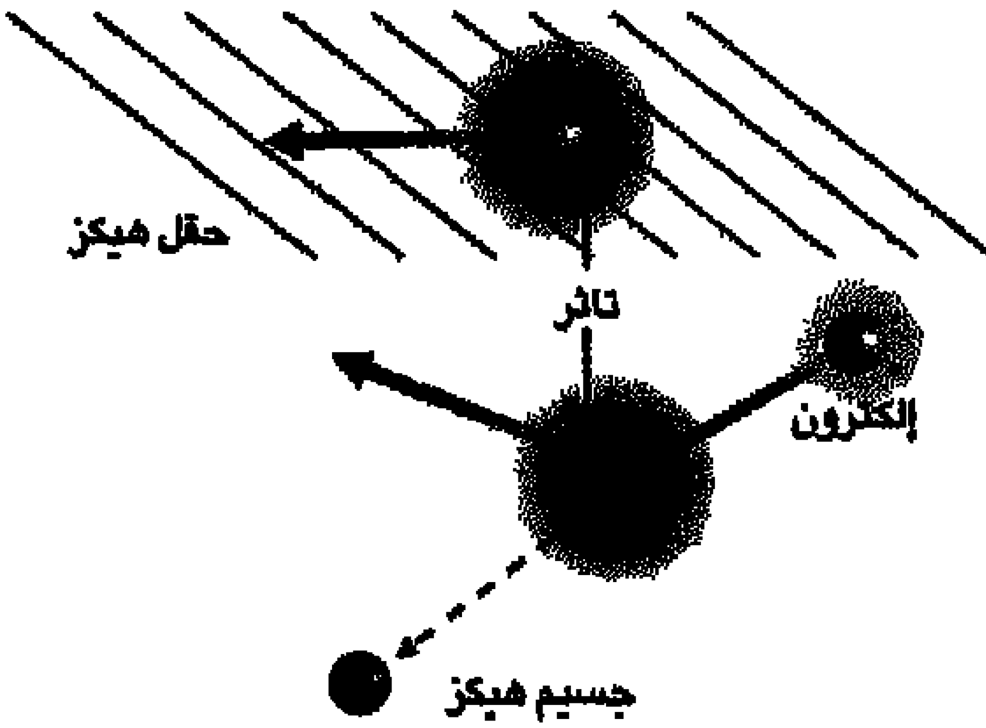
انتشار في الوجود المادي

الحقل العادي، مثل الحقل الكهرمغنطيسي، تكون طاقته الدنيا عند شدة الحقل المعدومة (*في اليمين*). والكون مثل كرة كانت تتدحرج ثم سكنت في قعر الوادي ـ أي إنه استقر عند شدة الحقل المعدومة. أما حقل هيكز، على العكس من ذلك، فله طاقة دنيا عند شدة حقل غير معدومة، و«الكرة» تسكن عند قيمة لا تساوي الصفر (*في اليسار*). وعلى هذا فالكون، في حالته الطاقية الدنيا الطبيعية، ينتشر في حقل هيكز الذي قيمته غير معدومة.



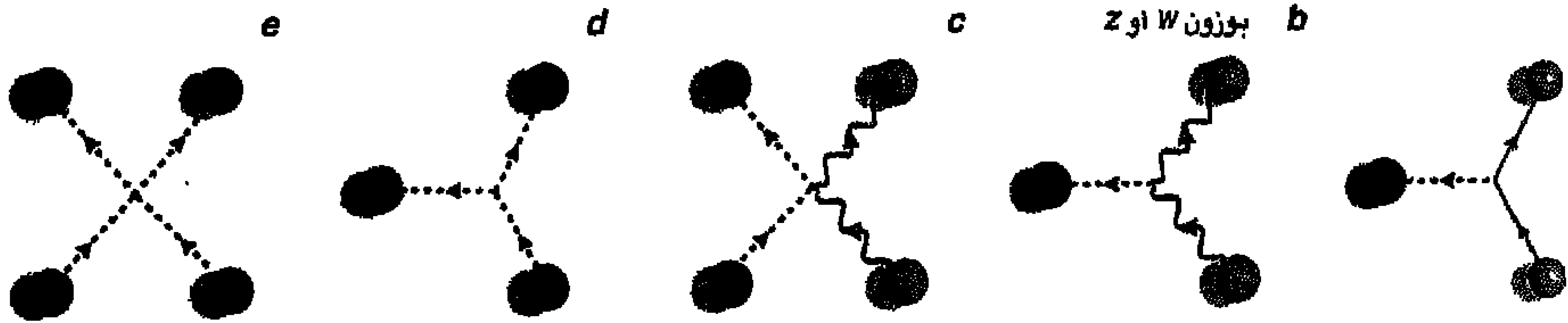
التسبب في ظاهرتين

يسبب التآثر نفسه ظاهرتين مختلفتين تمامًا ـ اكتساب الجسيم كتلة (*في الأعلى*) وإنتاج بوزون هيكز (*في الأسفل*). وسوف تكون لهذه الحقيقة فائدة عظمى في اختبار نظرية هيكز بوساطة التجارب.

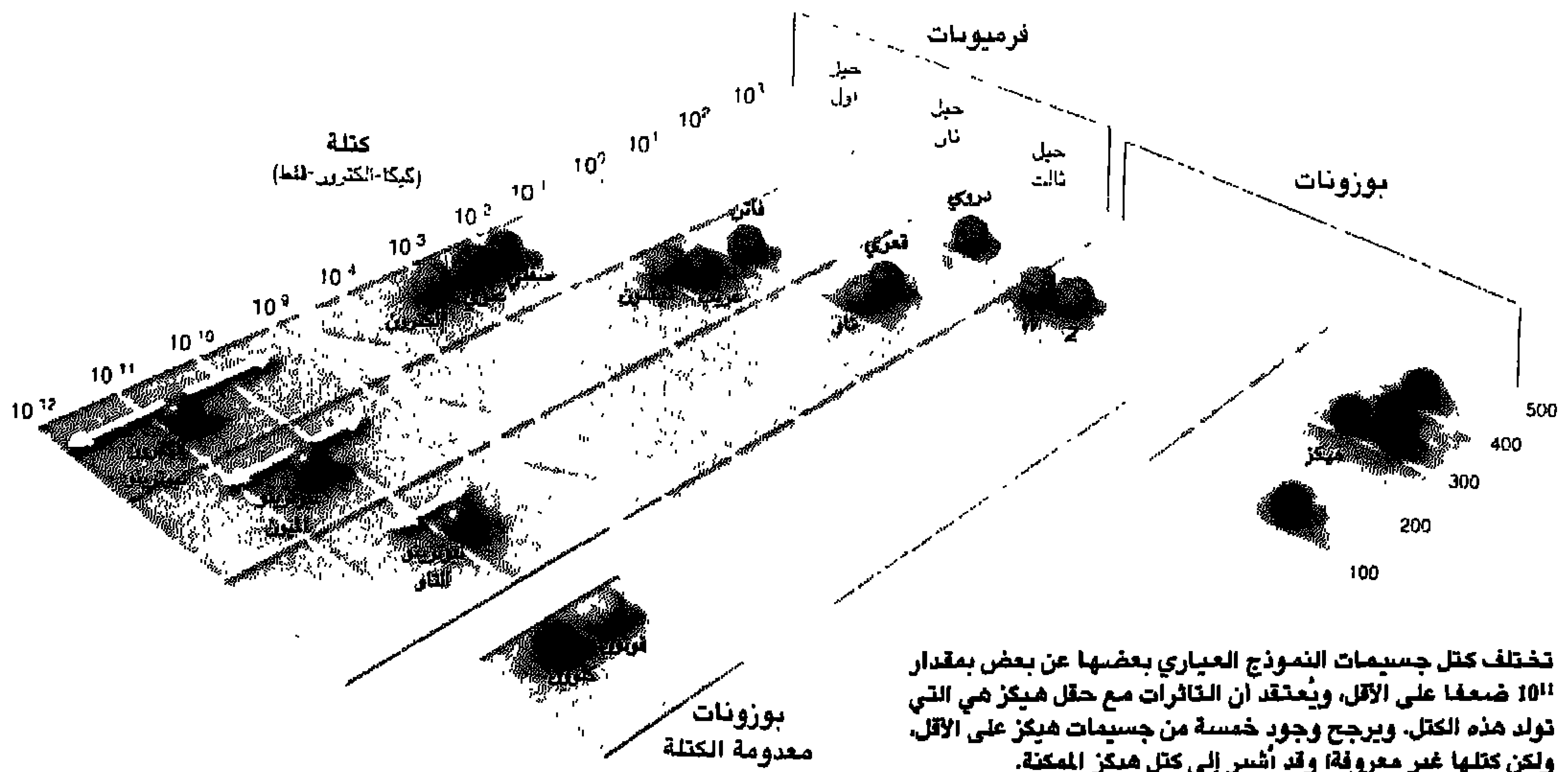


التآثر مع جسيمات أخرى

تمثل مخططات القوة المسماة «مخططات فينمان» Feynman diagrams كيفية تآثر جسيم هيكز مع جسيمات أخرى. ويمثل المخطط (*a*) جسيمًا مثل الكوارك أو الإلكترون وهو يُصدر أو يمتص جسيم هيكز (مرسوم). ويبين المخطط (*b*) العملية المناظرة بالنسبة إلى بوزون *W* أو *Z*. ويمكن للبوزونين *W* و *Z* أن يتآثرا كذلك آنيًا مع جسيمي هيكز كما هو مبين في المخطط (*c*) الذي يمثل أيضًا بعثرة *W* أو *Z* لجسيم هيكز (أو تصادمهما معه إن صح القول). إن التآثرات الممثلة بوساطة المخططات من (*a*) إلى (*c*) هي أيضًا المسؤولة عن توليد كتل الجسيمات. فجسيم هيكز يتآثر كذلك مع نفسه كما هو ممثل في المخططين (*d*) و (*e*). ويمكن بناء عمليات أكثر تعقيدًا بوساطة ربط نسخ من هذه المخططات الأولية بعضها ببعض. والتآثران الموضحان في المخططين (*d*) و (*e*) مسؤولان عن شكل المنحني البياني للطاقة [*في الأعلى إلى اليمين*].



(*) properties of the Elusive Higgs



تختلف كتل جسيمات النموذج العياري بعضها عن بعض بمقدار 10^{11} ضعفا على الأقل، ويُعتقد أن التأثرات مع حقل هيگز هي التي تولد هذه الكتل. ويرجح وجود خمسة من جسيمات هيگز على الأقل، ولكن كتلها غير معروفة؛ وقد أشير إلى كتل هيگز الممكنة.

ثانياً، بمجرد أن تُكشف بوزونات هيگز يصبح بإمكاننا ملاحظة الكيفية التي تتأثر بها هذه البوزونات مع الجسيمات الأخرى. وحدود دالة لاگرانجيان التي تحدد كتل الجسيمات هي ذاتها التي تحدد أيضاً خصائص مثل هذه التأثرات. ولهذا يمكننا إجراء تجارب لاختبار وجود حدود ذلك النوع من التأثر كمياً، ذلك أن شدة التأثر ترتبط بكتلة الجسيم ارتباطاً فريداً.

ثالثاً، تتضمن المجموعات المختلفة من حقول هيگز، كتلك الموجودة في النموذج العياري أو في النماذج SSM المتنوعة، مجموعات مختلفة من بوزونات هيگز ذات الخصائص المتباينة. ولذلك فإن بإمكان الاختبارات أن تميز بين هذه الخيارات أيضاً. وكل ما نحتاج إليه لإجراء الاختبارات هو مصادمات جسيمات مناسبة ــ أي مصادمات ذات طاقة كافية لإنتاج بوزونات هيگز المختلفة، وذات شدة كافية لإنتاج عدد كاف منها، وكذلك مكاشيف جيدة لتحليل ما ينتج.

والمشكلة العملية في إجراء مثل هذه الاختبارات هي أننا لم نفهم بعد النظريات فهماً جيداً يكفي لحساب الكتل التي ينبغي أن تكون لبوزونات هيگز نفسها، وهذا يجعل البحث عنها أكثر صعوبة لأن المرء عليه أن يتفحص سلسلة من الكتل. إن الجمع بين الاستدلال المنطقي النظري والبيانات التجريبية يمكن أن يرشدنا إلى الكتل التقريبية المتوقعة. كان المصادم الإلكتروني ــ البوزيتروني الكبير (LEP)[3] في المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات CERN بالقرب من مدينة جينيف قد جرى تشغيله على مدى كتلي يشتمل، باحتمالية عالية، على بوزون هيگز. لكنه لم يجده ــ على الرغم من أنه كان ثمة دليل ختّار tantalizing على وجود بوزون عند حدود طاقة المصادم وشدته بالضبط ــ قبل أن يغلق عام 2000 مفسحاً مكانه لبناء منشأة أحدث هي مصادم الهادرونات الكبير (LHC)[4] التابع لمختبر سيرن. وعلى هذا ينبغي أن تكون بوزونات هيگز أثقل بنحو 120 مرة من كتلة البروتون. ومع ذلك تمكّن المصادم LEP من إعطاء دليل غير مباشر على وجود بوزون هيگز: فقد أجرت التجارب في المصادم LEP عدداً من القياسات الدقيقة يمكن ضمها إلى قياسات مشابهة من التيــڤاترون ومن المصادم في مركز المسرّع الخطي في ستانفورد. ولا تتفق مجموعة البيانات جميعها اتفاقاً جيداً مع النظرية إلا إذا أُدخلت تأثرات معينة للجسيمات مع أخف بوزون من بوزونات هيگز، وإلا إذا لم يكن هذا البوزون أثقل بنحو 200 مرة من كتلة البروتون. وهذا يوفر للباحثين حداً أعلى لكتلة بوزون هيگز مما يساعد على تركيز البحث.

وبالنسبة إلى السنوات القليلة المقبلة فإن المصادم الوحيد الذي يمكنه أن يعطي دليلاً مباشراً على وجود بوزونات هيگز هو التيــڤاترون. فطاقته تكفي لاكتشاف بوزون هيگز في المدى الكتلي الذي حدده الدليل غير المباشر من المصادم LEP، وذلك إذا تمكن من التوصل إلى الشدة الثابتة للحزمة التي كان يتوقع له أن ينتجها، والتي لم يمكن التوصل إليها حتى الآن. ومن المخطط له أن يبدأ المصادم LHC، والذي تفوق طاقته سبع مرات طاقة التيــڤاترون والمصمم أن تكون شدته أكبر بكثير، بإعطاء البيانات عام 2007. سيكون هذا المصادم مَصنعاً لبوزونات هيگز (بمعنى أنه سوف ينتج العديد من الجسيمات كل يوم). إذا افترضنا أن المصادم LHC سيعمل كما هو مخطط له، فإن جمع البيانات ذات الصلة وتعلّم كيفية تفسيرها سيستغرق سنة أو اثنتين. أما إجراء كامل الاختبارات التي تبين بالتفصيل أن التأثرات مع حقول هيگز هي التي تسبب الكتلة فسوف يحتاج إلى مصادم إلكتروني ــ بوزيتروني إضافة إلى المصادم LHC (الذي يصادم البروتونات) والتيــڤاترون (الذي يصادم البروتونات والبروتونات المضادة).

---

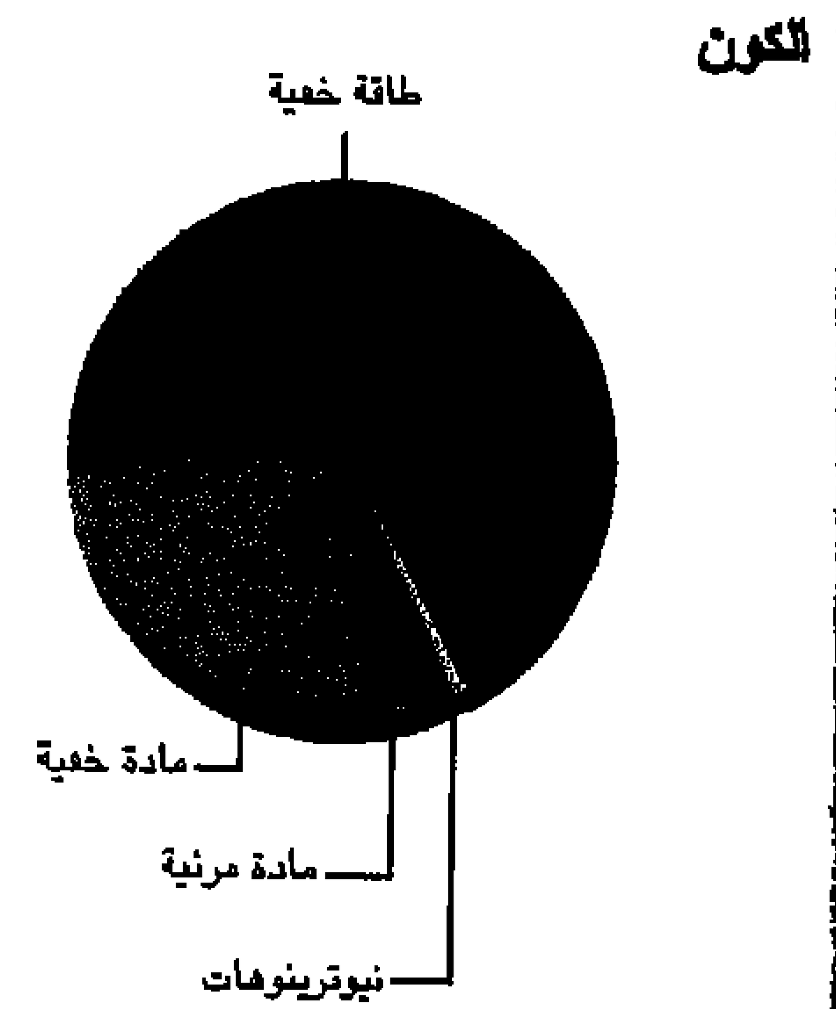
(3) Large Electron-Positron Collider

(4) Larg Hadron Collider

تفسر نظرية حقل هيگز كيف تكتسب الجسيمات الأولية، وهي أصغر لبنات الكون، كتلها. لكن آلية هيگز ليست المصدر الوحيد للكتلة ـــ الطاقة في الكون [تشير، الكتلة ـــ الطاقة، إلى كل من الكتلة والطاقة المرتبطتين بعلاقة آينشتاين $E = mc^2$].

يوجد نحو 70 في المئة من الكتلةـــ الطاقة في الكون على شكل ما يسمى بالطاقة الخفية dark energy، والتي لا ترتبط مباشرة بالجسيمات. والمؤشر الرئيسي على وجود الطاقة الخفية هو أن تمدد الكون متسارع. وتعتبر الطبيعة الدقيقة للطاقة الخفية من أكثر المسائل العميقة التي لاتزال مفتوحة في الفيزياء[1].

الكون



توجد كتلة ـــ طاقة الكون بصورة رئيسية في أربعة أنماط عريضة: الطاقة الخفية الغامضة التي تسبب تسارع تمدد الكون، والمادة الخفية غير المرئية التي يمكن كشفها بوساطة آثارها الثقالية، والمادة المرئية والنيوترينوهات.

أما كتلة ـــ طاقة الكون المتبقية والتي تشكل 30 في المئة فتأتي من المادة، من الجسيمات التي لها كتلة. وأكثر أنواع المادة شيوعاً هي البروتونات والنيوترونات والإلكترونات التي تشكل النجوم والكواكب والناس وكل ما نراه. وتوفر هذه الجسيمات نحو سدس مادة الكون أو نحو 4 إلى 5 في المئة من الكون كله. وكما هو مشروح في النص الرئيسي لهذه المقالة فإن معظم هذه الكتلة ينشأ عن طاقة حركة الكواركات والگلوونات الدائرة داخل البروتونات والنيوترونات.

ويأتي إسهامٌ أصغر في مادة الكون من الجسيمات المدعوة نيوترينوهـــات، والتي تضم ثلاثة أنواع. إن للنيوترينوهات كتلةً إلا أنها صغيرة إلى حد مذهل، ولم يتم قياس الكتل المطلقة للنيوترينوهات بعد، لكن البيانات الموجودة تضع لها حداً أعلى ـــ فهي أقل من نصف في المئة من الكون.



معظم المادة المرئية محصورة في البروتونات والنيوترونات. وكل من هذين النوعين من الجسيمات يتألف من كواركات وگلوونات تدور وتلف. ومعظم كتلة البروتون أو النيوترون تأتي من طاقة حركة الكواركات والگلوونات.

وبقية المادة جميعها تقريباً ـــ نحو 25 في المئة من مجمل كتلة طاقة الكون ـــ هي مادة لا نراها، تدعى المادة الخفية. ونستنتج وجودها من آثارها الثقالية على ما نراه. ولا نعرف بعد ما هي هذه المادة الخفية بالفعل، لكن هناك آراء جيدة مطروحة، والتجارب تجرى لاختبار مختلف الأفكار [*انظر: «البحث عن المادة المعتمة»، العلوم، العددان 9/8 (2003)، ص50*]. يجب أن تكون المادة الخفية مؤلفة من جسيمات كبيرة الكتلة لأنها تشكل تجمعات حجمها بحجم المجرة تحت تأثيرات قوة الثقالة. وهناك عدد من المبررات تجعلنا نستنتج أن المادة الخفية لا يمكن أن تكون مؤلفة من أي من جسيمات النموذج العياري المألوفة.

والجسيم الأوّل المرشح للمادة الخفية هو القرين الفائق الأخف (LSP) الذي جرى الحديث عنه بتفصيل أكبر في النص الرئيسي لهذه المقالة. ويأتي القرين الفائق الأخف في توسعات النموذج العياري المسماة النماذج العيارية الفائقة التماثل. ويعتقد أن كتلة الجسيم LSP تبلغ نحو 100 ضعف من كتلة البروتون. وكان قد تبين للنظريين أن الجسيم LSP هو مرشح جيد للمادة الخفية قبل أن يعرف الكوسمولوجيون أنه يلزم نوع جديد من المادة الأساسية لتفسير المادة الخفية.

(*) A Cosmic Stocktaking

(1) [انظر: "A Cosmic Conundrum", by Lawrence M. Krauss-Michael S. Turner; Scientific American, September 2004].

المادة الخفية(*)

لن تختبر المكتشفات حول بوزونات هيگز ما إذا كانت آلية هيگز توفر الكتلة فحسب، وإنما سوف تشير أيضاً إلى الطريقة التي يوسّع بها النموذج العياري لكي يحل مسائل مثل منشأ المادة الخفية.

وفيما يتعلق بالمادة الخفية، فإن الجسيم الأساسي في النظرية SSM هو القرين الفائق الأخف (LSP) lightest superpartner. ومن بين القرائن الفائقة لجسيمات النموذج العياري المعروفة والتي تنبأت بها النظرية SSM فإن القرين LSP هو الجسيم ذو الكتلة الأخفض. وتتفكك معظم القرائن الفائقة في الوقت المعين إلى قرائن فائقة ذات كتل أقل، وتنتهي سلسلة التفككات بالجسيم LSP المستقر لأنه ليس هناك جسيم أخف منه يتفكك إليه. (حين يتفكك قرين فائق فإن أحد نواتج التفكك على الأقل يجب أن يكون قريناً فائقاً آخر؛ ولا ينبغي أن يتفكك إلى جسيمات النموذج العياري كلياً). يجب أن تكون الجسيمات القرائن الفائقة قد وُجدت في وقت مبكر في الانفجار الأعظم لكنها سرعان ما تفككت إلى الجسيمات LSP. والجسيم LSP هو المرشح الرئيسي للمادة الخفية.

يمكن لبوزونات هيگز أن تؤثر مباشرة أيضاً في كمية المادة الخفية في الكون. فنحن نعلم أن كمية الجسيمات LSP حالياً ينبغي أن تكون أقل من الكمية التي كانت موجودة بعد الانفجار الأعظم بقليل، لأن بعضها لابد أن يكون قد تصادم وفَنِيَ متحولاً إلى كواركات ولبتونات وفوتونات، وربما كانت الجسيمات LSP المتأثرة مع بوزونات هيگز هي المسيطرة على معدل الفناء.

وكما ذكرنا آنفاً فإن حقلي هيگز الأساسيين في النماذج SSM يعطيان لجسيمات النموذج العياري كتلة، كما يعطيان بعض الكتلة للقرائن الفائقة مثل LSP. وتكتسب القرائن الفائقة مزيداً من

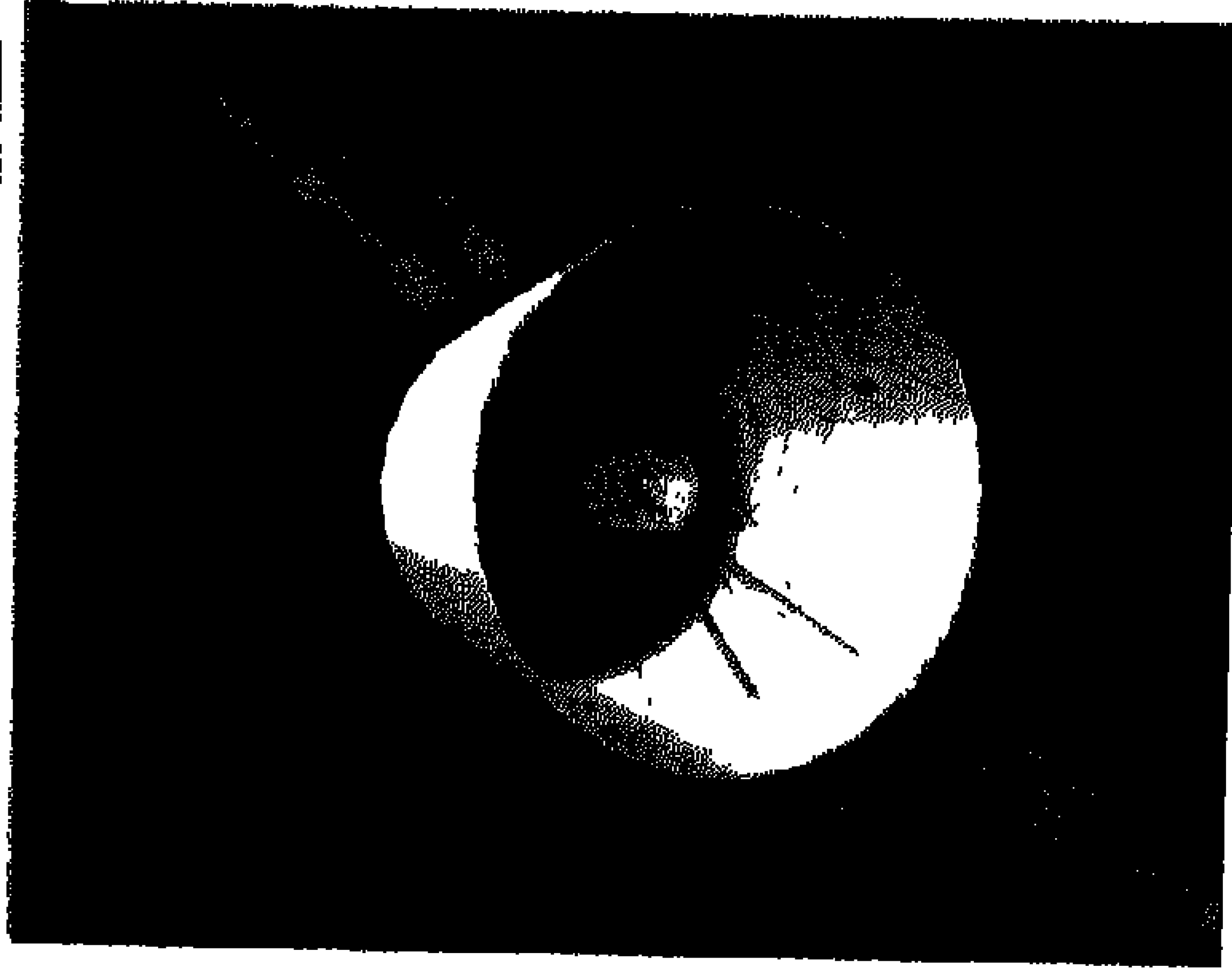
(*) Dark Matter

الكتلة بوساطة التأثرات الإضافية التي يمكن أن تحدث مع حقول هيگز أخرى أو مع حقول مماثلة لحقول هيگز. ويوجد لدينا نماذج نظرية لكيفية حدوث هذه العمليات، ولكننا لن نتمكن من معرفة كيفية عملها بالتفصيل ما لم تكن لدينا بيانات حول القرائن الفائقة نفسها. ومن المتوقع الحصول على مثل هذه البيانات من المصادم LHC أو ربما حتى من التيــڤاترون.

يمكن أيضاً أن تنشأ كتل نيوترينو عن تأثرات مع حقول هيگز إضافية أو مع حقول تشبه حقول هيگز بطريقة مشوقة جداً. لقد افترض في الأصل أن النيوترينوهات معدومة الكتلة، لكن منذ عام 1979 تنبأ النظريون بأن لها كتلاً صغيرة، وعلى مدى العقد الماضي أثبتت عدة تجارب مثيرة للإعجاب هذه التنبؤات *[انظر: «حل مشكلة النيوترينو الشمسي»، العلوم، العددان 9/8 (2003)، ص40].* إن كتل النيوترينوهات أقل من جزء من المليون من كتلة أصغر الجسيمات كتلة وهي كتلة الإلكترون. ولما كانت النيوترينوهات متعادلة كهربائياً فإن الوصف النظري لكتلها أكثر حذاقة منه بالنسبة إلى الجسيمات المشحونة. فهناك عدة عمليات تسهم في كتلة كل من أنواع النيوترينو، ولأسباب فنية فإن قيمة الكتلة الفعلية تنشأ عن حل معادلة بدلاً من مجرد جمع الحدود.

وهكذا نكون قد فهمنا الطرق الثلاث التي تنشأ بوساطتها الكتلة: يأتي الشكل الرئيسي المألوف لدينا للكتلة ــ كتلة البروتونات والنيوترونات، ومن ثم الذرات ــ من حركة الكواركات المرتبطة بالبروتونات والنيوترونات. فكتلة البروتون تبقى هي نفسها تقريباً حتى من دون حقل هيگز. أما كتل الكواركات نفسها وكتلة الإلكترون فهي ناشئة عن حقل هيگز. وهذه الكتل يمكن أن تنتفي من دون هذا الحقل. وأخيراً، وبالتأكيد ليس آخراً، فإن معظم مقدار كتل القرائن الفائقة، ومن ثم كتلة جسيم المادة الخفية (إذا كان بالفعل هو القرين الفائق الأخف) تأتي من تأثرات إضافية غير تأثر هيگز الأساسي.

وأخيراً لننظر في أمر يعرف باسم مسألة الأسرة (العائلة) family problem. فقد بيّن الفيزيائيون على مدى نصف القرن الماضي أن العالم الذي نراه، من الناس إلى الأزهار إلى النجوم، مبني من ستة جسيمات فقط: من ثلاثة جسيمات مادية (كواركات علوية وكواركات سفلية وإلكترونات) ومن كَمَّيْ قوة[5] (فوتونات وگلوونات) ومن بوزونات هيگز ــ وهذا وصف رائع وبسيط لدرجة مدهشة. إلا أن هناك إضافة إلى ذلك أربعة كواركات أخرى وجسيمين آخرين شبيهين بالإلكترون وثلاثة نيوترينوهات. وهذه جميعها ذات عمر قصير جداً أو أنها تتأثر بالكاد مع الجسيمات الستة الأخرى. ويمكن أن تصنف في ثلاث عائلات: علوي، سفلي، نيوترينو الإلكترون، الإلكترون؛ ثم: فاتن، غريب، نيوترينو الميون، الميون؛ وأخيراً: ذروي، قعري، نيوترينو التاو، تاو. وللجسيمات في كل عائلة تأثرات مماثلة لتلك التي للجسيمات في



ربما يكون جسيم هيگز قد أحدث حين تصادم بوزيترون وإلكترون عاليا الطاقة في المكشاف L3 بالمصادم الإلكتروني البوزيتروني الكبير في المركز CERN. تمثل الخطوط مسارات الجسيمات. وتصور اللطخات الخضراء والأرجوانية والرسم البياني histogramm ذو اللون الذهبي مقادير الطاقة التي تودعها الجسيمات المتناثرة من التفاعل في طبقات المكشاف. ولا يستطيع الفيزيائيون أن يستنتجوا ما إذا كانت جسيمات هيگز موجودة في بعض التفاعلات أم أن جميع البيانات كانت ناتجة من تفاعلات أخرى حدثت لتخلي إشارة هيگز، إلا بعد ضم الكثير من مثل هذه الأحداث.

العائلات الأخرى. وهي تختلف فقط في أن تلك التي في العائلة الثانية تكون أثقل من تلك التي في العائلة الأولى، وتلك التي في العائلة الثالثة تكون بدورها أثقل. ونظراً لأن هذه الكتل تنشأ عن التأثر مع حقل هيگز فإنه ينبغي أن تكون للجسيمات تأثرات مختلفة مع هذا الحقل.

وعلى هذا فإن مسألة العائلة ذات شطرين: لماذا توجد ثلاث عائلات في حين أنه يبدو أن واحدة فقط تلزم لوصف العالم الذي نراه؟ ولماذا تختلف العائلات عن بعضها بالكتلة، ولماذا لها هذه الكتل؟ ربما لا يكون جلياً لماذا يُدهش الفيزيائيون من أن الطبيعة تحتوي على ثلاث عائلات متماثلة تقريباً على الرغم من أن واحدة منها كافية. السبب في ذلك أننا نرغب في أن نفهم فهماً كاملاً قوانين الطبيعة والجسيمات والقوى الأساسية. ونتوقع أن يكون كل مظهر من مظاهر القوانين الأساسية ضرورياً. فالهدف إذاً هو أن تكون لدينا نظرية تنشأ فيها جميع الجسيمات ونسب كتلها بصورة محتومة من دون افتراضات مفترضة خصيصاً حول قيم الكتل ومن دون تعديل الوسطاء. فإذا كان وجود ثلاث عائلات أمراً أساسياً فإن في هذا مؤشراً لايزال مغزاه غير مفهوم حتى الآن.

ربط الأمور جميعها معا(*)

بإمكان النموذج العياري والنظرية SSM أن يستوعبا البنية العائلية المرصودة ولكنهما لا يستطيعان تفسيرها. وهذه إفادة قوية. ليس الأمر في أن النظرية SSM لم تفسر بعد البنية

(5) two force quanta

(*) tying It All Together

العائلية وإنما في أنها لا تستطيع ذلك. وبالنسبة إلي، فإن أكثر ما يثير في نظرية الأوتار ليس فقط أنها يمكن أن توفر لنا نظرية كمومية لجميع القوى، وإنما كذلك لأنها يمكن أن تخبرنا عن ماهية الجسيمات الأولية والسبب في وجود ثلاث عائلات. وتبدو نظرية الأوتار قادرة على معالجة مسألة لماذا تختلف التآثرات مع حقل هيگز بين العائلات. ففي نظرية الأوتار يمكن أن توجد عائلات مكررة، ولكنها غير متطابقة. وتصف الاختلافات بينها الخصائصُ التي لا تؤثر في القوى الشديدة والضعيفة والكهرمغنطيسية والثقالية، وإنما تؤثر في التآثرات مع حقول هيگز التي تتلاءم مع وجود ثلاث عائلات ذات كتل مختلفة. وعلى الرغم من أن نظريي الأوتار لم يحلوا بعد تماماً مسألة وجود ثلاث عائلات فإنه يبدو أن النظرية تمتلك البنية الصحيحة لتوفير حل. تتيح نظرية الأوتار العديد من البنى العائلية وحتى الآن لا يعرف أحد لماذا تختار الطبيعة البنية التي نرصدها دون غيرها[6]. ويمكن أن يوفر وجود بيانات عن كتل الكواركات واللبتونات وعن كتل أقرانها الفائقة دلائل مهمة تفيدنا في فهم نظرية الأوتار.

بإمكان المرء الآن أن يفهم لماذا استغرق الأمر تاريخياً كل هذا الوقت لنبدأ بفهم الكتلة. فمن دون فيزياء جسيمات النموذج العياري، ومن دون تطور نظرية الحقل الكمومية لوصف الجسيمات وتآثراتها، لم يكن بإمكان الفيزيائيين حتى أن يصوغوا الأسئلة الصحيحة. وفي حين أن أصول الكتلة وقيمها ليست بعد مفهومة تماماً إلا أنه من المرجح أن الإطار اللازم لفهمها موجود. لم يكن فهم الكتلة ممكناً قبل وجود نظريات مثل النموذج العياري وامتداده الفائق التماثل ونظرية الأوتار. وليس من الواضح بعد ما إذا كانت ستوفر بالفعل الجواب الكامل. لكن الكتلة أصبحت الآن موضوع بحث روتيني في فيزياء الجسيمات.

المؤلف

Gordon Kane

متخصص في نظرية الجسيمات، وهو أستاذ الفيزياء في جامعة ميتشيگان بآن آربر. يعمل (كين) على اكتشاف طرق لاختبار النموذج العياري لفيزياء الجسيمات وتوسيعه. وبصورة خاصة يدرس فيزياء هيگز وتوسّعات النموذج العياري الفائقة التماثل والكوسمولوجيا، مع التركيز على الربط بين النظرية والتجربة. وقد أكد حديثًا على ضم هذه الموضوعات مع نظرية الأوتار وعلى دراسة نتائج ذلك على تجارب المصادمات.

مراجع للاستزادة

The Particle Garden. Gordon Kane. Perseus Publishing, 1996.

The Little Book of the Big: A Cosmic Primer. Craig J.Hogan. Copernicus Books, 1998.

Mass without Mass II: The Medium Is the Mass-age. Frank Wilczek in *Physics Today*, Vol. 53, No. 1, pages 13-14; January 2000.

Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature. Gordon Kane. Perseus Publishing, 2001.

An excellent collection of particle physics Web sites is listed at particle adventure. Org/particleadventure/other/othersites. Html.



(6) [انظر: "The String Theory Landscape," by Raphael Bousso and Joseph Polchinski; Scientific American, Septemper 2004].

صنع مادة مضادة باردة(*)

إن ذرات الهيدروجين المضاد المنخفضة الطاقة ستمكّن الباحثين من اختبار إحدى الخصائص الأساسية للكون.

(p.G كولنز)

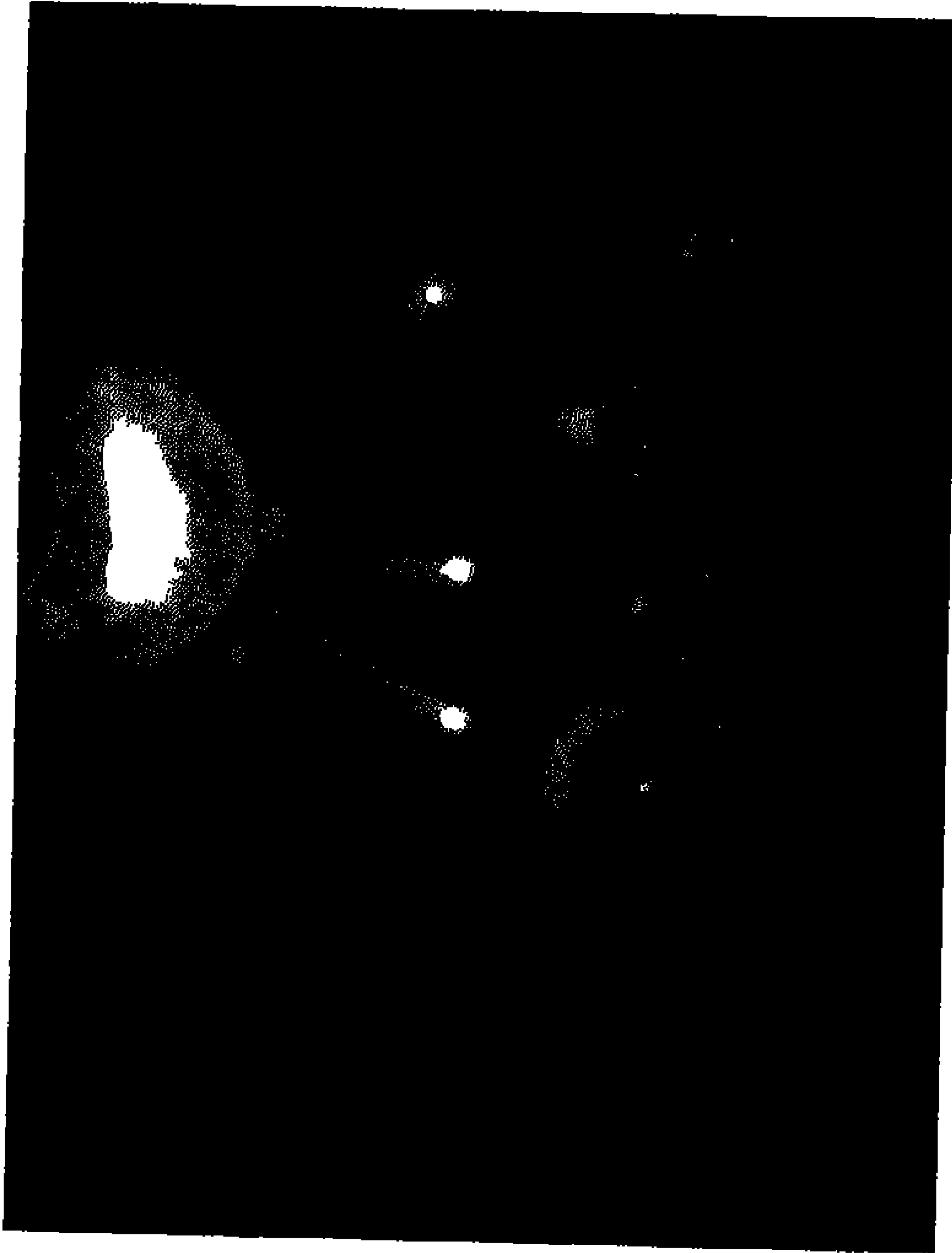
المادة المضادة هي الخصم الرهيب للمادة العادية..

إن أشكال المادة المضادة هي كالتوأم الشيطاني لمقابلاتها الدنيوية في كل شيء إلا أن لها شحنة معاكسة. وهي تبشر بفناء عنيف إذا حدث والتقى الزوجان، من المادة العادية والمادة المضادة، معاً. وبالفعل فإن الحريق الهائل الناشئ عن دمج غرام واحد من المادة مع قرينه من المادة المضادة يطلق طاقة تكافئ نحو 40 ألف طن من مادة التفجير TNT، أو طاقة تكفي 5000 منزل لمدة عام كامل.

لحسن الحظ بالنسبة إلى سلامتنا، ولسوء الحظ بالنسبة إلى سياسة إنتاج الطاقة، فإن المادة المضادة نادرة الوجود في العالم الطبيعي. وتطلق بعض المواد المشعة بوزترونات، وهي الجسيمات المضادة للإلكترونات، وهي تستخدم في التصوير الطبقي البوزتروني PET. كما يتساقط عدد ضئيل من البروتونات المضادة بصورة دائمة من الفضاء الخارجي ضمن الأشعة الكونية. أضف إلى ذلك أن الهمرات[1] العملاقة من الجسيمات، التي تحدث عندما يصطدم جسيم أشعة كونية ذو طاقة عالية بذرة ما في الجو تحتوي على عدد كبير من الجسيمات المضادة.

لكن عندما يصل الأمر إلى القطع الكبيرة فلا توجد أجسام مضادة. حتى الذرات المنفردة من المادة المضادة، أو ما يسمى بالذرات المضادة[2]، لا يُعرف أنها توجد في الطبيعة. ومع ذلك ترى النظرية أن دراسة الذرات المضادة يمكن أن تسهم في التعميق في فهم قوانين الفيزياء، ولذلك بدأ العلماء بمحاولة تصنيع مواد مضادة خاصة بهم، فابتدعوا في السنوات الأخيرة تقنيات ماهرة محققين بذلك بعض النجاح في هذا المجال.

ومنذ عام 1955 أخذ علماء فيزياء الجسيمات يشكّلون حزماً من البروتونات المضادة. ولقد تم هذا الإنجاز في المسرّع بيفاترون Bevatron في مختبر لورنس بركلي الوطني وذلك بقذف البروتونات على قطعة من النحاس، وهي سيرورة معاكسة للإفناء[3]، حيث يتحول جزء من طاقة التصادم الخالصة إلى أزواج من البروتونات والبروتونات المضادة المحدثة. أما اليوم فيتم في مختبر فرمي الوطني في باتافيا بولاية إيلينوي إخراج البروتونات المضادة التي تدور في حلقات ضخمة لجعلها تصطدم مباشرة بحزمة مماثلة من البروتونات، وذلك بهدف دراسة فيزياء الجسيمات عند الطاقات العالية جداً.



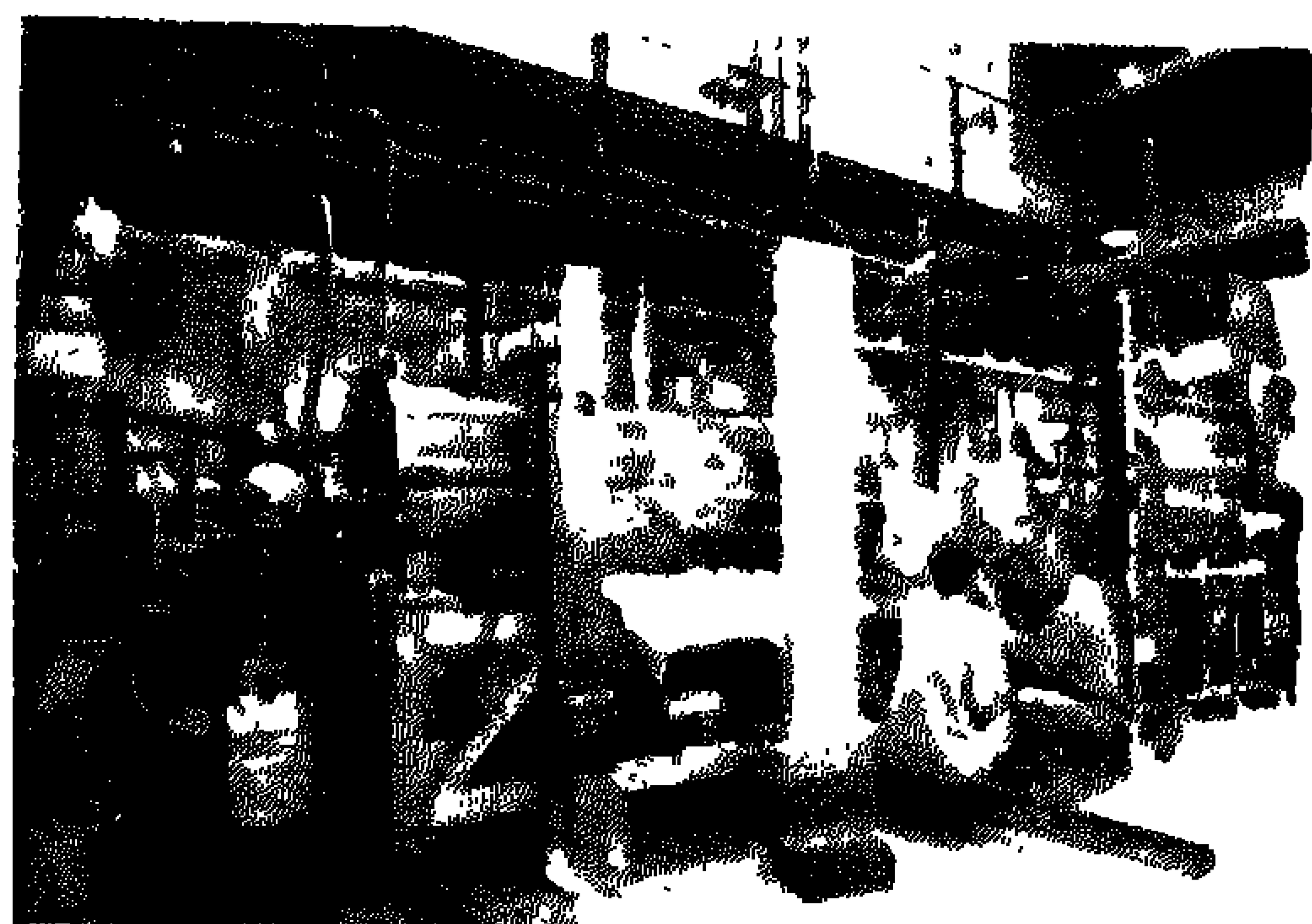
ذرات الهيدروجين المضاد المؤلفة من بوزترون (الأحمر) يدور حول بروتون مضاد (الأخضر) تبتعد عن النقطة التي تشكلت فيها وتضرب الجدار المادي المحيط بها حيث تفنى مصدرة دفقة من الجسيمات العالية الطاقة.

(*) MAKING COLD ANTIMATTER

(1) showers.

(2) anti-atom.

(3) Annihilation.



أداة المجموعة ATHENA في المركز سيرن بالقرب من جنيف هي إحدى منشأتين تنتجان الهيدروجين المضاد البارد.

وكانت أولى الذرات المضادة التي وُجدت من صنع علماء المركز سيرن CERN[4] في عام 1955. فقد رتبوا أن تتقاطع حزمة من البروتونات المضادة تدور في حلقة تخزين مع نفثة من ذرات الكزينون xenon. وقد يحدث أن يُنتج أحد التصادمات زوجاً من إلكترون وبوزترون يطيران مبتعدين معاً ومشكّلين ذرة هيدروجين مضاد. وقد شاهد فريق البحث تسعاً من هذه الذرات المضادة يسابق بعضها بعضاً بسرعة تقارب سرعة الضوء. وفي عام 1988 أنتجت تجربة مماثلة في مختبر فِرمي 57 ذرة مضادة.

إلا أن مثل هذه الذرات المضادة ذات السرعات العالية ليست مفيدة جداً. ويريد العلماء، لدراسة خصائص الذرات المضادة دراسة أكثر عمقاً، الإمساك بها في محبس ذرات[5]، أي إن عليهم أن يبطئوها ويبردوها إلى أقل من 0.5 كلـڤن. وكانت مجموعتان بحثيتان متنافستان تنافساً شديداً تعملان في المركز سيرن تتابعان هذا الهدف. المجموعة الأولى هي المجموعة ATRAP التي يقودها (G. گبريلس) [من جامعة هارڤارد] وهي مجموعة تنحدر من مجموعة سابقة (تسمى المجموعة TRAP)، رائدة في عملية حصر البروتونات المضادة وتبريدها[6]. والمجموعة الثانية ATHENA بقيادة (R. لاندوا) [من المركز سيرن] انضمت إلى التنافس متأخرة، لكنها كانت في عام 2002 السبّاقة (بعدة أسابيع) في نشر بحث يُعلَن فيه اكتشاف ذرات هيدروجين مضاد باردة. وتدرس مجموعة ثالثة، هي ASACUSA، ذرات هيليوم غريبة استُبدل فيها إلكترون ببروتون مضاد.

مع أن بعض الباحثين يحدوهم الأمل في أنه في يوم ما سوف تستخدم المادة المضادة وسيلة للدفع Propulsion. [انظر الإطار في الصفحة 975] إلا أن الهدف الرئيسي المباشر من دراسة الجسيمات المضادة يرتبط بما يسمى مبرهنة التناظر (التماثل)[7] CPT التي تربط بين خصائص أنواع الجسيمات المختلفة وقريناتها من الأجسام المضادة وتتنبأ النظرية بأن كلاً منهما يجب أن يتبع القوانين الفيزيائية ذاتها. ويأمل العلماء، عقد الحصول على عدد كاف من الذرات المضادة المحتجزة، أن يروا ما إذا كانت ذرة الهيدروجين المضاد يمكن أن تُصدر أو تمتص الضوء تماماً بالترددات نفسها كما هو الأمر بالنسبة إلى ذرة الهيدروجين. فإذا كان التناظر CPT مطبّقاً وجب أن يكون الطيفان متطابقين.

إن للتناظرات المرتبطة بالتناظر CPT، تاريخياً، سجلاً من الهزائم، فقد انتُهك كل منها بوساطة العالَم الحقيقي. وفي كل مرة يفشل فيها تنبؤ تناظر يتعلم الفيزيائيون المروَّعون معلومات جديدة عن خصائص القوى والجسيمات الأولية. ويعتبر انتهاك الهيدروجين المضاد للتناظر CPT بمنزلة الجد للتناظرات المكسورة وهو يؤدي إلى تداعيات رئيسية على مفاهيم الفيزيائيين للواقع الحقيقي.

ولفهم ما هو التناظر CPT بدقة أكبر ولماذا هو بتلك الأهمية لنفصل الأحرف CPT إلى مكوناتها حيث تشير الأحرف الثلاثة إلى: عكس الشحنة[8] وانعكاس الندية[9] وعكس الزمن[10]. فعكس الشحنة هو استبدال جميع الجسيمات بالجسيمات المضادة. وانعكاس الندية هو أساساً الانعكاس في مرآة (وبدقة أكبر، هو انعكاس الفضاء حول نقطة). وعكس الزمن يعني تشغيل «فيلم» الواقع الحقيقي إلى الخلف.

نظرة إجمالية/أولى الذرات المضادة(**)

- للجسيمات المضادة شحنة معاكسة لقريناتها من الجسيمات العادية وعندما يتقابل الاثنان يفني أحدهما الآخر حيث يطلقان كمية كبيرة من الطاقة. ومنذ عهد قريب نجح الفيزيائيون في تكوين أول مادة مضادة (ذرات مضادة) تسير بسرعات منخفضة نسبياً.
- يمكن في المستقبل استخدام هذه الذرات المضادة التي تتكون من هيدروجين مضاد لدراسة خاصية أساسية للكون وهي تلك المعروفة بتماثلية CPT. ويعتبر أي انتهاك ولو بسيط جداً لتماثلية CPT اكتشافاً مهماً يؤدي إلى علم فيزياء جديد.
- وعلى الرغم من ذلك فإن درجة حرارة ذرة الهيدروجين المضاد تصل إلى 2400 درجة مطلقة، وهي أعلى بكثير جداً من النصف درجة المطلقة اللازمة لحصرها لدراسات التماثلية CPT. ومن ثم يصبح الهدف الرئيسي التالي هو إنتاج ذرات مضادة في درجات حرارة منخفضة وفي حالات صالحة للدراسات الطيفية.

(**) overview/ The First Anti-atoms.

(4) المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات بالقرب من جنيف.
(5) atom trap.
(6) [انظر: "Extremely Cold Antiprotons", by G. Gabrielse; Scientific American, December 1992].

(7) Charge-Parity-Time symmetry.
(8) charge reversal.
(9) parity inversion..
(10) time reversal.

إن القول إن التناظر P يعمل، أو إن الطبيعة «صامدة» invariant بالنسبة إلى التناظر P، يعني أن أية سيرورة فيزيائية تُرصد في مرآة تبقى تتبع القوانين نفسها كما هو الأمر بالنسبة إلى السيرورة غير المنعكسة. فإذا تخيلت نفسك ترمي كرة في الهواء أمام مرآة بدا التناظر P بديهياً بالحدس. فكيف يمكن ألا يُتبع هذا التناظر في أية سيرورة كانت؟ وما يدعو إلى الدهشة أن التناظر P، كما اكتُشف في عام 1956، يخرقه التأثر النووي الضعيف[11]، الذي تتضمنه بعض التفككات decays ذات النشاط الإشعاعي. فتفكك الكوبالت 60 في الواقع يبدو مختلفاً عن تفكك الكوبالت 60 الذي يُرى في مرآة. ومثل لاعبة التنس التي تؤرجح المضرب بيدها اليمنى (ولذلك يكون انعكاسها باليد اليسرى) فإن لتفكك الكوبالت 60 يدوانية handedness ذاتية تقبلها المرآة.

في العديد من المواقف التي يُكسر فيها التناظر P فإن التناظر CP يبقى على الرغم من ذلك، محافظاً عليه، أي إن صورة ذرة كوبالت مضاد في المرآة تتصرف بطريقة مطابقة لذرة كوبالت واقعية. وذلك يشبه كون الشخص المضاد أيسر فتكون صورته في المرآة يمينية أي مثل الشخص الأصلي غير المنعكس.

لقد أدهش الفيزيائيين اكتشافهم عام 1964، أن التناظر CP يُكسر أيضاً في حالات نادرة في بعض السيرورات. وعلى الرغم من الندرة الكبيرة للتناظر CP المكسور فإنه يمكن أن يكون له دور في شرح هيمنة المادة على المادة المضادة في الكون *[انظر الإطار التالي]*.

لا تناظر المادة في الكون (**)

عند بدء الكون في الانفجار الأعظم كان على الطاقة المنطلقة أن تنتج كميات متساوية من المادة والمادة المضادة ولكن كيف أمكن لمثل هذا الكون أن يتطور إلى ما نراه الآن، حيث يتكون كل شيء تقريباً من المادة؟ لقد رد العالم الروسي الكبير (A. ساخاروف) على هذا السؤال في عام 1967 عندما بيّن أن أحد الشروط الأساسية لهذا التطور هو ظاهرة تسمى انتهاك التناظر CP، تسمح للجسيمات بالتفكك بمعدلات تختلف عن تلك الخاصة بالمادة المضادة.

تجرى حالياً تجربتان ــ الأولى BaBar [في مركز ستانفورد] للمسرّع الخطي (SLAC) والأخرى Belle في تسوكوبا باليابان ــ تدرسان انتهاك التناظر CP في تفكك جسيمات وجسيمات مضادة تسمى الميزونات B. وفي الشهر 2004/8 أعلنت الاثنتان عن رصد مباشر لمقدار كبير من انتهاك التناظر CP بوساطة الميزونات B: فقد حدث نوع معين من التفكك أكثر بكثير بالنسبة إلى الجسيمات منه بالنسبة إلى الجسيمات المضادة.

وحتى الآن يتفق مقدار الانتهاكات للتناظر CP المرصودة مع تنبؤات النموذج العياري لفيزياء الجسيمات لكن تفاعلاً معيناً يظهر زيادة طفيفة للانتهاكات للتناظر CP. وإذا تم التأكد من ذلك كان مؤشراً إلى فيزياء تشمل جسيمات لم تكتشف بعد[1]. مع ذلك فإن مقدار الانتهاك المرصود حتى الآن لا يبدو كافياً لجعل نموذج (ساخاروف) يعلل اللاتناظر بين المادة والمادة المضادة في كوننا.

(**) Matter Asymmetry in the Universe.

(1) [انظر: "the Dawn of physics beyond the Standard Model, by G. Kane [Scientific American, june 2003

---

(11) weak nuclear interaction.

وهذا يُبقي التناظر CPT: وهو المكافئ لما يمكن أن نراه إذا شاهدت فيلماً تمثل فيه الجسيمات المضادة ويُعرض الخلف في مرآة. إن صمود التناظر CPT[12] يعني أن هذا الفيلم المضاد المعكوس المجنون يتبع نفس قوانين الفيزياء بالضبط مثل الواقع. وإذا اختلف تصرف هذا الفيلم المضاد المعكوس في أي شيء عن فيلم الواقع كان هذا الاختلاف «انتهاكاً» للتناظر CPT[13].

إن للتناظر CPT أسساً رياضياتية عميقة. فهو متماسك مع معادلات نظرية الحقل الكمومية التي تصف الجسيمات الأساسية والقوى. وقد بقيت فيزياء الجسيمات لأكثر من نصف قرن مبنية على نظرية الحقل الكمومية؛ وسوف يشير انتهاك التناظر CPT إلى انهيارها. وسوف تعتبر مثل هذه النتيجة مؤشراً مهماً لكيفية تطوير نظرية الفيزياء تذهب لما هو أبعد من النموذج العياري[14] لفيزياء الجسيمات.

لقد استنتج الفيزيائيون من تجارب فيزياء الجسيمات المتضمنة جسيمات غير مستقرة أن أي انتهاك للتناظر CPT يجب أن يكون صغيراً جداً. إضافة إلى أنه عندما أجرت مجموعة گبريلس TRAP تجارب لمقارنة البروتونات المضادة المحتجزة بالبروتونات فإنهم تحققوا من التناظر CPT لهذا النوع من الجسيمات بدقة أكبر بكثير من أية دقة تم التوصل إليها سابقاً. ولكن لابد للبحث أن يستمر عند مستويات من الدقة أعلى فأعلى وذلك لأن هناك أسباباً تدعو إلى توقع إمكان حدوث انتهاك التناظر CPT في مقياس أصغر[15]. إن مطيافية الهيدروجين ذات دقة عالية. فإذا أمكن التوصل إلى الدقة نفسها بالنسبة إلى الهيدروجين المضاد أوصلت مقارنة الطيفين الفيزياء إلى أبعد بكثير من الحدود الحالية للتناظر CPT المتعلق بالجسيمات المستقرة.

يمكن أن تتأثر المادة المضادة، إضافة إلى كونها تنتهك التناظر CPT أحياناً، بالثقالة gravity بطريقة مختلفة عن المادة. إذ ليس صحيحاً أن المادة المضادة سوف تعاني ثقالة مضادة وتنافر مع المادة، كما يعتقد البعض خطأ. وإنما يمكن أن تنعكس مركّبة صغيرة جداً من قوة الثقالة بالنسبة إلى المادة المضادة. وسوف يجعلنا مثل هذا الاكتشاف نراجع بعمق فهمنا للثقالة. فدراسة الأجسام المضادة المشحونة مثل البوزترونات والبروتونات المضادة هي دراسة لا أمل منها في فحص تأثيرات الثقالة؛ ذلك أن الاضطرابات الناشئة عن الحقول الكهربائية أو المغنطيسية التائهة أكبر بكثير. ومع ذلك يمكن تصور أنه يمكن تبريد الذرات المضادة المعتدلة إلى درجات حرارة منخفضة جداً ورصدها وهي تسقط سقوطاً حراً كما جرى بالنسبة إلى الذرات العادية المبردة باستخدام الليزر. ولكن تجارب الثقالة ستكون تقنياً أكثر صعوبة بمراحل من اختبارات التناظر CPT.

---

(12) CPT invariance أو عدم تغير الــ CPT

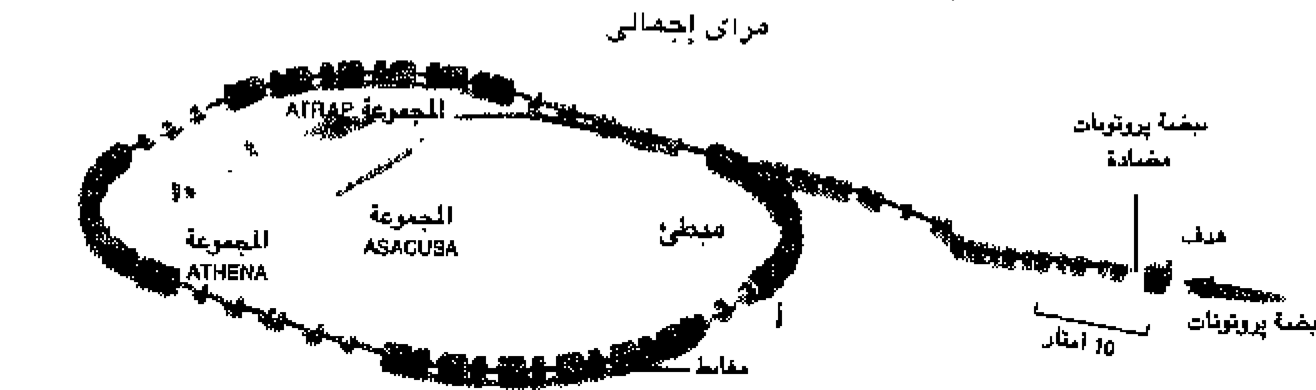
(13) violation of CPT symmetry

(14) Standard Model.

(15) [انظر: "The Search for Relativity Violations", by A. Kostelecky ." Scientific American, September 2004]

صنع واكتشاف هدروجين مضاد بارد(*)

لصنع ذرات هدروجين مضاد، يجب على الفيزيائيين أن ينتجوا بروتونات مضادة وبوزترونات ويجمعوها معا. وينتج مبطّئ البروتونات المضادة التابع للمركز سيرن (في اليسار) بروتونات مضادة ذات طاقة منخفضة نسبيا لثلاث تجارب ـ ATRAP و ATHENA و ASACUSA. ويحتجز حقلان، أحدهما مغنطيسي والآخر كهربائي، تلك البروتونات المضادة والبوزترونات عند كل من طرفي أداة مخلأة لها شكل الأنبوب (في الأسفل). ثم يعدّل الحقلان لجمع الجسيمات إلى بعضها في محبس مزج. وقد كانت المجموعة ATRAP، ومن قبلها المجموعة TRAP، السبّاقة في اكتشاف مبادئ تشغيل محبس المزج. أما المخططات في الأسفل فتتعلق بأداة المجموعة ATHENA.

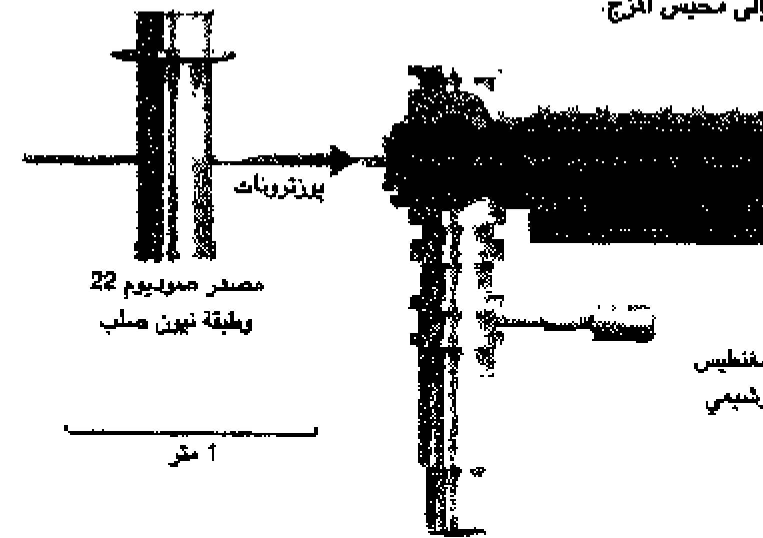


ماسك بروتونات مضادة ومحبس المزج

يجمع ماسك البروتونات المضادة (في اليمين) نبضات من البروتونات المضادة من المبطئ (التفصيل في اليمين). وعند تجميع عدد كاف من البروتونات المضادة تُنقل إلى محبس المزج. ويحفظ المحبس البروتونات المضادة والبوزترونات التي تم الحصول عليها من مجمّع البوزترونات الذي يظهر في اليسار في المنطقة نفسها من الفضاء، وهذا يؤدي إلى تشكل ذرات الهدروجين المضاد (التفصيل في الوسط).

مُجمّع بوزتروني

تبطأ البوزترونات المنبعثة من مصدر الصوديوم 22 (في أقصى اليسار) أولا بوساطة مرورها من خلال طبقة رقيقة من النيون الصلب ثم بوساطة التصادم مع غاز النتروجين. يلتقط محبس بيننگ البوزترونات المبطأة، وعندما يتجمع عدد كاف من البوزترونات يُضخ النتروجين إلى الخارج وتُنقل البوزترونات إلى محبس المزج.

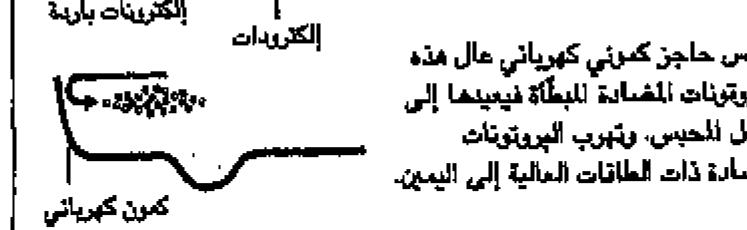


كيف يعمل ماسك بروتونات مضادة

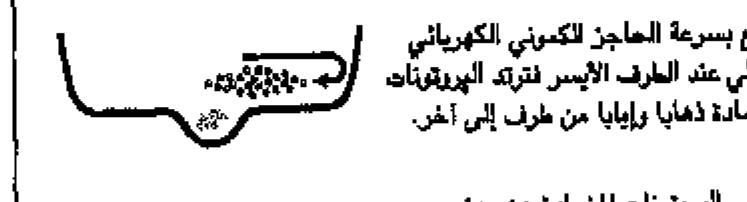
يتم ملء المحبس مسبقا بسحابة باردة من الإلكترونات ثم تدخل البروتونات المضادة القادمة من المبطئ من خلال جدار رقيق من الألمنيوم.



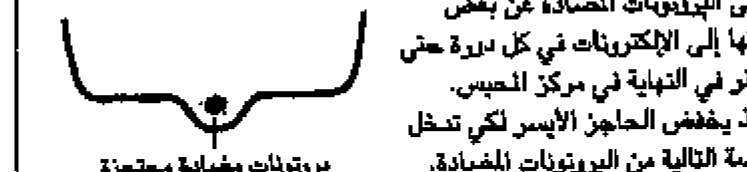
يبطئ الألمنيوم من سرعة بعض البروتونات المضادة.



يعكس حاجز كموني كهربائي عال هذه البروتونات المضادة المبطأة فيعيدها إلى داخل المحبس، وتهرب البروتونات المضادة ذات الطاقات العالية إلى اليمين.



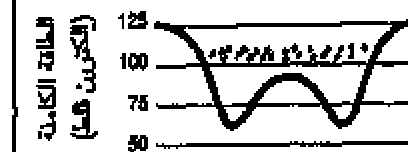
يُرفع بسرعة الحاجز الكموني الكهربائي العالي عند الطرف الأيسر فتترك البروتونات المضادة ذهابا وإيابا من طرف إلى آخر.



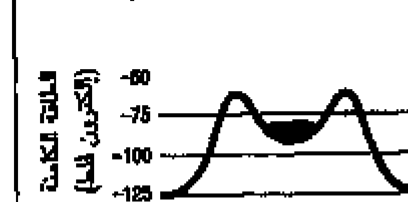
تتخلى البروتونات المضادة عن بعض طاقتها إلى الإلكترونات في كل دورة حتى تستقر في النهاية في مركز المحبس. عندئذ يخفض الحاجز الأيسر لكي تدخل النبضة التالية من البروتونات المضادة.

كيف يعمل محبس مزج متداخل

ليس بالإمكان تجميع البوزترونات في البئر الكمونية نفسها التي تجمع سحابة من البروتونات المضادة، و لذلك لا بد لمحبسها من أن يتداخل مع محبس البروتونات المضادة.



تترك البروتونات المضادة ذهابا وإيابا داخل بئر كمونية كبيرة وعميقة ذات هضبة في وسطها.



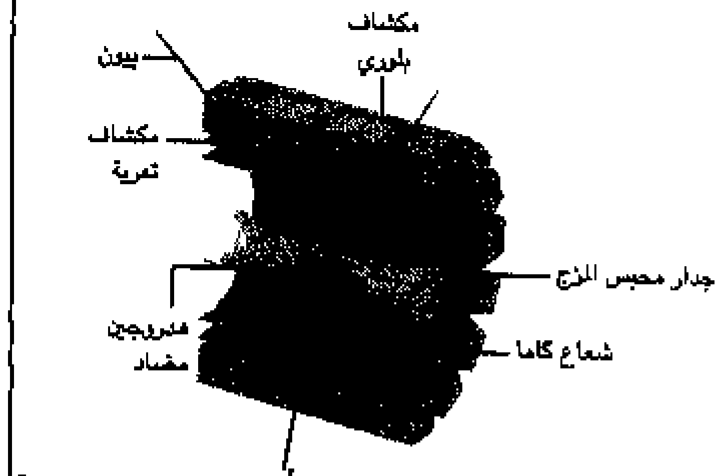
«ترى» البوزترونات، ذات الشحنة المعاكسة، الكمون معكوسا ولذلك تصبح الهضبة انخفاضا عند قمة تل واسعة.



يحبس الانخفاض البوزترونات داخل نفس المنطقة من الفضاء التي فيها البروتونات المضادة، مما يمكّن تشكل ذرة هدروجين مضاد.

كيف يعمل المكشاف

عندما تتشكل ذرات الهدروجين المضاد في داخل محبس المزج تتسرب الذرات المضادة، لكونها معتدلة، إلى خارج المحبس و تصطدم بجدران الحاوية. وهناك يلتقي البروتون المضاد والبوزترون فتنتج ثلاثة بيونات pions ذات طاقة عالية إضافة إلى زوج من أشعة گاما. وتكشف طبقات من مكاشيف الجسيمات المحيطة بمنطقة المزج هذه الانبعاثات.



Making and Detecting Cold Antihydrogen (*)

مكوّنات مضادة(*)

لصنع ذرات الهيدروجين المضاد اللازمة لهذه التجارب لابد من مكونين هما البوزترونات والبروتونات المضادة. وهما يختلفان بشكل كبير في صعوبة تصنيعهما. إذ يمكن الحصول على البوزترونات بسهولة نسبياً، فهناك العديد من النظائر المشعة[16] التي تطلقها في عملية تسمى التفكك بيتا. أما البروتونات المضادة فلابد من صنعها كلية.

تستخدم التجارب في المركز سيرن نظيرَ الصوديوم 22 مصدراً للبوزترونات. إذ تطلق قطعة من الصوديوم وزنها غرام واحد 200 تريليون بوزترون كل ثانية. ولكن هذه البوزترونات تنطلق وطاقتها تبلغ 550 كيلوإلكترون فلط تكافئ درجة حرارة قدرها ستة بلايين درجة سيلزية. ولابد، لكي تكون ذات فائدة في صنع هيدروجين مضاد بارد من إبطائها من سرعة انطلاقها، وهي نحو تسعة أعشار سرعة الضوء، إلى مجرد كيلومترات في الثانية. ويتم التوصل إلى الإبطاء بوساطة سلسلة من العمليات المختلفة *[انظر الصفحتين 972 و973]*. فبعد نحو خمس دقائق تجمع المجموعة ATHENA نحو 75 مليون بوزترون معلقة بوساطة حقول مغنطيسية وكهربائية في محبس بيننغ Penning ذي الخلاء العالي (المسمى باسم الفيزيائي <M.F. بيننغ> الذي اخترع هذا التصميم عام 1936). أما المجموعة ATRAP فهي على العكس من ذلك تحتجز نحو خمسة ملايين بوزترون. والمحابس تمسك بالبوزترونات إمساكاً جيداً: فبعد ساعة لم يفقد منها سوى عدد ضئيل.

نظراً لأن البروتونات المضادة لا تنتج من أي مصدر مشع مناسب فإنه يجب على الباحثين تكوين هذه الجسيمات المضادة من طاقة خالصة، وهذا ما يقومون به بإطلاق بروتونات على هدف معدني. تنتج هذه العملية، إضافة إلى جسيمات أخرى، نبضة عالية الطاقة من البروتونات المضادة. ولصنع هيدروجين مضاد بارد، يجب على التجريبيين إبطاء البروتونات المضادة إلى درجة حرارة قريبة من درجة حرارة البوزترونات. وتستخدم نفس التقانة تقريباً، التي تسرّع حزم الجسيمات، إنما بطريقة معكوسة لإجراء المرحلة الأولى من عملية الإبطاء. وتنفذ عملية الإبطاء هذه في المركز سيرن منذ عام 2000 بوساطة مبطئ البروتونات المضادة Anti-proton Decelerator.

يُصدر مبطئ البروتونات المضادة كل دقيقة ونصف الدقيقة نبضة تحتوي على نحو 20 مليون بروتون مضاد. تسير هذه الجسيمات بسرعة تبلغ نحو عُشر سرعة الضوء فقط، أي إن طاقتها نحو خمسة ميكا إلكترون فلط ثم يتم إبطاؤها أكثر من ذلك بوساطة نافذة رقيقة من الألمنيوم، وفي النهاية تُقَص طاقتها إلى عدة إلكترونات فلط فقط في محبس بيننغ. ويمكن أن تضاف دفعات متتالية من البروتونات المضادة من مبطئ البروتونات المضادة إلى المحبس، وهي عملية اخترعتها المجموعة TRAP وتسمى التكويم stacking. يستطيع محبس المجموعة ATHENA أن يحتفظ بعشرة آلاف من البروتونات المضادة لعدة ساعات

(*) Anti-Ingredients.

(16) radioactive.

الإنتاج المتحكَّم فيه بوساطة الليزر(*)

قدمت المجموعة ATRAP طريقة تحكُّم بوساطة أشعة الليزر لإنتاج ذرات الهدروجين المضاد من دون الحاجة إلى المحابس المتداخلة (*الجهاز في الأسفل ووصف العملية في أسفل اليسار*) فعوضا عن هذه المحابس تُحتجز البروتونات المضادة والبوزترونات في محبسين متجاورين، وتَنقل «ذرات» البوزترونيوم المعتدلة (إلكترون و بوزترون يدور أحدهما حول الآخر) البوزترونات إلى البروتونات المضادة. ولا بد أن يضمن تتابع التفاعلات أن تكون لذرات الهدروجين المضاد الناتجة سرعات منخفضة (أي درجة حرارة منخفضة). ولكن هذا لم يؤكَّد حتى الآن

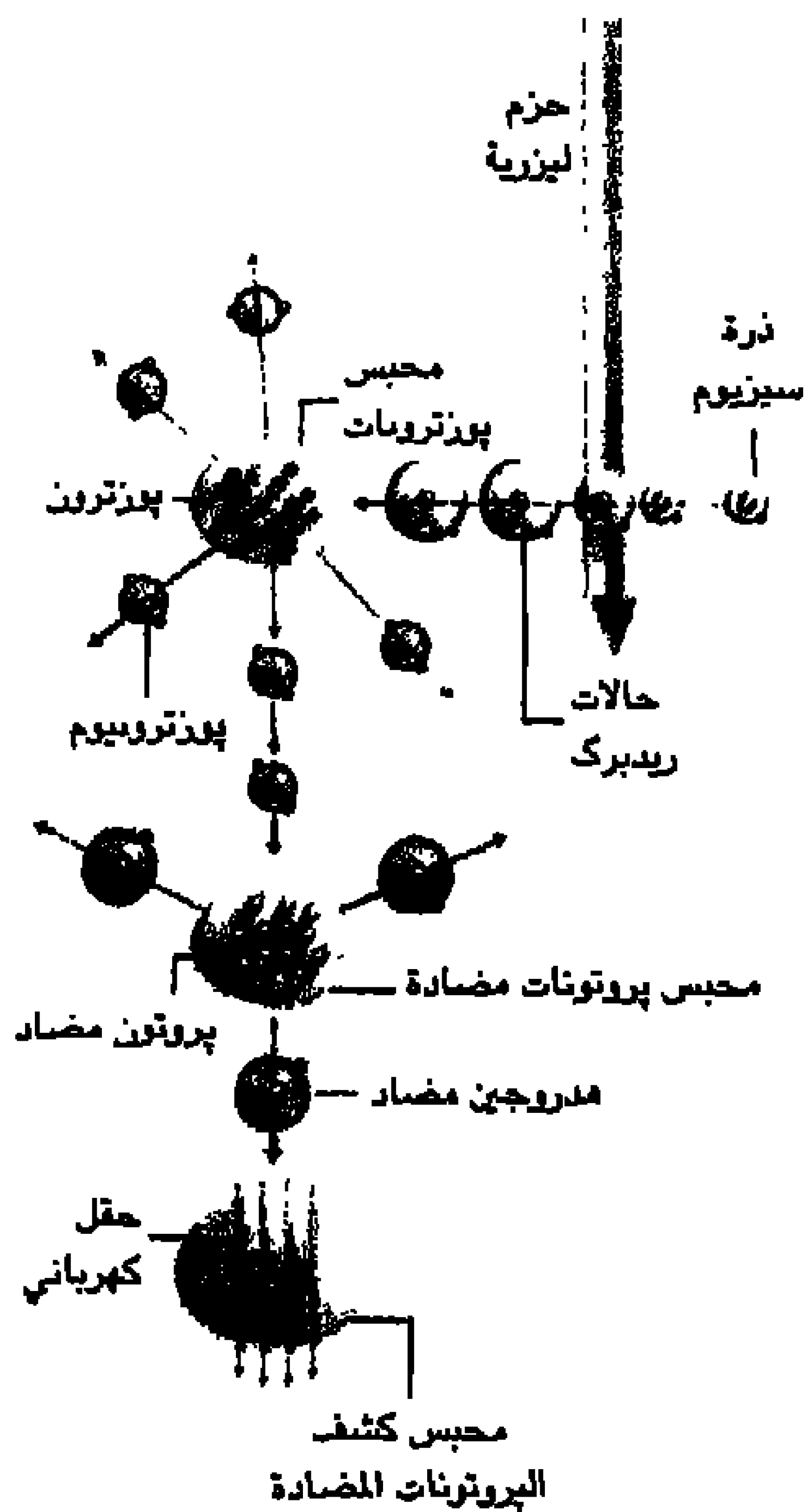


1 تمر ذرات السيزيوم القادمة من فرن من خلال حزم ليزرية مولِّدة لإثارة الذرات إلى حالات ريدبرك المنتفخة

2 تأسر البوزترونات في المحبس الإلكترونات المثارة من ذرات السيزيوم مكونة البوزترونيوم في حالات ريدبرك أيضا ولكون ذرات البوزترونيوم معتدلة فإنها تهرب من المحبس في جميع الاتجاهات

3 تذهب بعض ذرات البوزترونيوم إلى محبس البروتونات المضادة حيث تلتقط البروتونات المضادة البوزترونات مكونة ذرات الهدروجين المضاد التي تهرب من المحبس في جميع الاتجاهات.

4 تذهب بعض ذرات الهدروجين المضاد إلى محبس بروتونات مضادة ثان حيث ينزع حقل كهربائي عال البوزترونات منها. ثم يتم كشف البروتونات المضادة المحتجزة كدليل على تشكل ذرات الهدروجين المضاد.



أما محبس المجموعة ATRAP، ذو الخلاء الأفضل، فتمكَّن من الاحتفاظ بمليون بروتون مضاد من دون أي فقد ذي شأن لمدة شهرين.

محابس متداخلة(*)

بدأ احتجاز الجسيمات المشحونة منذ عقود، ولكن المحابس العادية لا تستطيع احتجاز سوى الجسيمات التي لها إشارة الشحنة نفسها («القطبية» نفسها). فعلى سبيل المثال فإن محبس بيننغ الأسطواني الذي يحتجز البوزترونات لا يحتجز البروتونات المضادة. ويصمم هذا المحبس بحيث يحصر الحقلُ المغنطيسي الجسيمات قطرياً ويرفع الحقل الكهربائي الجهد[17] عند كل من طرفي الأسطوانة.

وبالنسبة إلى البوزترونات يمكن للمرء أن يتخيل أن الجهد عند الطرفين بمنزلة منحدر، وأن الجسيم كأنه كرة تتدحرج إلى أعلى هذا المنحدر. فالبوزترونات التي تتحرك ببطء كاف تتوقف ثم تعود للنزول بحيث تبقى دائماً في داخل المحبس. ولكن للأسف فإن البروتونات المضادة، ذات القطبية المعاكسة، لن ترى منحدرات صاعدة عند كل من الطرفين بل منحدرات شاقولية تسقط وفقها إلى الأسفل فتصطدم بمادة الجدران التي تحفظ الخلاء وتُفقد هناك. ولابد، لاحتجاز البروتونات المضادة، من عكس الحقل الكهربائي؛ أي قلب الجهد.

ولقد اقترح (كبريلس) والعاملون معه في عام 1988 حيلة لاحتجاز أنواع ذات شحنات متعاكسة معاً. يوضع محبس ضحل لجسيمات لها قطبية معينة داخل محبس أعمق لجسيمات ذات قطبية معاكسة. فيرى نوع الجسيمات المحتجز بوساطة الجدران الخارجية بئراً عميقة لها هضبة في المركز مثل قاع زجاجة النبيذ. أما النوع الآخر فيرى جميع الجهود معكوسة وتصبح الهضبة في قاع البئر كما لو كانت انخفاضاً في قمة جبل تحتجز الجسيمات. وتستخدم كل من المجموعتين ATRAP و ATHENA محبساً له هذا التصميم المتداخل للحفاظ على البروتونات المضادة والبوزترونات معاً في منطقة الهضبة لتبقى معاً. ولقد عرض (كبريلس) والعاملون معه هذه المنظومة وفيها بروتونات وإلكترونات عام 1996، وفيها بروتونات مضادة وبوزترونات عام 2001.

أحياناً تُنتج التصادمات بين الجسيمات المحتجزة معاً بوزتروناً وبروتوناً مضاداً يتحركان معاً في المسار نفسه. وفي الحال يبدأ الجسيمان بالدوران أحدهما حول الآخر، وها هي ذرة هيدروجين مضاد قد وُلدت.

اكتشاف(**)

تواجه الباحثين بعد حصولهم على ذرات الهيدروجين المضاد مشكلتان: الأولى، كيف يمكن كشف الذرات لإثبات أنها موجودة فعلاً؟ والأخرى، يجب أن يتم ذلك بسرعة لأن ذرات الهيدروجين المضاد معتدلة الشحنة فلا يمكن احتجازها بوساطة أي من المحبسين المتداخلين الكهرمغنطيسيين. وتطير الذرات بسرعة خارجة من المحبس مهما كانت سرعتها عندما تشكلت.

(*) Nested Traps

(17) potential.

(**) Detection.

طبقاً لوكالة الفضاء الأمريكية ناسا فإن 42 مليغرام من البروتونات المضادة تمتلك طاقة تساوي 750 ألف كيلوغرام من الوقود والمؤكسدات المخزنة في صهريج خارجي لمكوك فضاء. وتبدو الفائدة من مثل هذا المصدر المركز للطاقة من أجل الدفع واضحة، ولكن لابد من التغلب على العديد من الصعوبات قبل أن يصبح دفع سفن الفضاء باستخدام المادة المضادة واقعاً ملموساً.

المتطلب الأول بالطبع هو وجود طريقة عملية لإنتاج كميات تقدر بالمليغرامات من المادة المضادة. ينتج مبطئ البروتونات المضادة التابع للمركز سيرن 20 مليون بروتون مضاد كل 100 ثانية، فإذا عمل 24 ساعة كل يوم وسبعة أيام كل أسبوع لمدة عام كامل فلن يولّد سوى 10 بيكوغرامات من البروتونات المضادة.

وثانياً تلزم طريقة لاختزان كميات كبيرة من المادة المضادة ذلك لأن محابس الذرات المعتدلة تحتفظ بعدة ملايين فقط من هذه الذرات. وقد اقترح كل من (S.D. هاو) و(G.P. جاكسون) [من تقنيات H في ناسا] في مؤتمر عام 2003 أن يتم تخزين الهيدروجين المضاد (انتي بار) على شكل أقراص صلبة (يتجمد الهيدروجين، وكذلك الهيدروجين المضاد، عند الدرجة 14 كلـفن). والأقراص، التي ربما يبلغ قطرها نحو 150 ميكروناً، ستكون مشحونة كهربائياً ومعلقة في صفيف array من المحابس الكهراكدة (الكهربائية الساكنة) electrostatic.

وحتى إذا توافر مخزن مناسب للمادة المضادة وجب تحويل طاقة الإفناء إلى طاقة دفع. فعندما يتم إفناء إلكترون وبوزترون تتحرر الطاقة الناتجة على شكل شعاعين من أشعة كاما ينطلقان في اتجاهين متعاكسين أما إفناء بروتون وبروتون مضاد فإنه يُنتج جسيمات قصيرة العمر ذات طاقة عالية تسمى بيونات يمكن لهذه الجسيمات أن تستخدم في تسخين قلب من التنگستن يكون الهيدروجين قد مر فوقه. فيُنتج التمدد الحراري للهيدروجين الدفع المطلوب.

(*) Antimatter Propulsion: what Would it Take?.



تستخدم المنظومة المقترحة للدفع بالمادة المضادة أقراصاً من المادة المضادة لقدح انفجارات انشطارية في شراع مطلي باليورانيوم.

تعتبر الآلة التي تستخدم الحقول المغنطيسية لتوجيه البيونات نفسها كدوافع أكثر كفاءة بشكل كبير، ولكن قد يكون الدفع الكلي أقل بكثير وذلك لوجود كميات قليلة جداً من هذه الدوافع.

ولقد اقترح (هاو) و(جاكسون) طريقة ثالثة باستخدام أقراصهما من المادة المضادة لتشغيل منظومة شراعية إذ يتكون الشراع من كربون مطلي باليورانيوم، ويكون عمل اليورانيوم هو تفعيل انشطار نووي عندما تطلق عليه أقراص صلبة من الهيدروجين المضاد. وسيدفع انطلاق نواتج الانشطار الشراع، وهذا سيجر سفينة الفضاء. لكن فكرة تحفيز المادة المضادة للانشطار النووي بكفاءة ما هي إلا مجرد تخمين حتى هذه اللحظة.

تستخدم المجموعة ATHENA هذه المشكلة الثانية كحل للمشكلة الأولى. فعندما تقابل الذرات الخارجة مادةَ جدران الحاوية تتوقف. وفي الوقت نفسه تقريباً يفنى البوزترون لدى التقائه إلكتروناً من ذرة من ذرات الجدار وكذلك يفنى البروتون المضاد في نواة. ويولّد التفاعل الأول عادة شعاعين من أشعة گاما (511 كيلوإلكترون فلط) يسيران باتجاهين متعاكسين؛ في حين يولّد التفاعل الآخر جسيمين أو ثلاثة تسمى بيونات pions. وجميع هذه الجسيمات سهلة الكشف؛ ففي أية مرة ترى المكاشيف detector أشعة گاما المناسبة وبيونات تنشأ عن المكان نفسه في الجدار في الوقت ذاته، يعرف الباحثون أن ذرة هيدروجين مضاد قد تشكلت وأنها الآن فنيت.

إلا أن الأمور ليست بالضبط بهذه البساطة. فبعض البروتونات المضادة تفنى مولّدة همرة من البوزترونات، وهذه بدورها تنتج أشعة گاما طاقتها 511 كيلوفلط، يمكن كشف اثنين منها. وهكذا بإمكان البروتونات المضادة المنفردة أن تحاكي إشارة ذرة الهيدروجين المضاد. ولذلك لابد من قياس مستوى الإشارة الزائفة وحذفه من البيانات.

تستخدم المجموعة ATRAP تقنية مختلفة اختلافاً بيّناً تحذف الخلفية بكاملها. فلا يَعدّ الفريق إذاً سوى ذرات الهيدروجين المضاد التي يصادف أن تسير باتجاه محور المصيدة الأسطوانية ويصادف أن يكون ارتباطها ضعيفاً (أما جميع تلك التي تسير في الاتجاهات الأخرى أو المرتبطة ارتباطاً وثيقاً فتفلت من الكشف). وتمر هذه الذرات المضادة المعتدلة من دون عناء من خلال حاجز كمون[18] عالٍ يوقف جميع البروتونات المضادة الضالة التي هي ليست جزءاً من ذرة مضادة. ثم تواجه الذرات المضادة حقلاً كهربائياً قوياً يفصل البروتونات المضادة والبوزترونات في الذرات المضادة الضعيفة الارتباط وفي النهاية تؤسَر البروتونات المضادة المنزوعة في محبس كهرمغنطيسي آخر. وبعد فترة تجميع يُفرج عن هذه البروتونات المضادة وتُكشف من خلال فنائها على الجدران المجاورة.

وعندما لا تكون البوزترونات موجودة في المحبس المتداخل لا تُكشف بروتونات مضادة، وهذا يثبت أن البروتونات المضادة المنفردة لا يمكن لها أن تتخطى حاجز الكمون للوصول إلى المحبس البعيد. فالعدّ عند وجود البوزترونات هو إذاً عدّ ذرات الهيدروجين المضاد المعتدلة التي يصادف أن يكون ارتباطها ضعيفاً وتسير بالاتجاه الصحيح. فلا توجد إذاً خلفية يجب حذفها.

واستكمالاً لهذه التقنية الأساسية باستخدام حقل تعرية stripping field مهتز جمعت المجموعة ATRAP في عام 2004 معلومات عن سرعة تحرك ذرات الهيدروجين المضاد أو، بتعبير آخر، درجة

(18) potential barrier.

حرارتها. وكانت النتيجة غير مشجعة إلى حد ما: كانت درجة حرارة الذرات التي كشفتها المجموعة ATRAP تصل إلى 2400 كلـفن وهي أعلى بكثير من درجة حرارة مكونات المحبس المبرد بالهيليوم السائل البالغة 4.2 كلـفن. ويتطلب إجراء دراسات طيفية مفصلة للذرات المضادة أن تكون درجة حرارتها أقل من 0.5 كلـفن، بحيث يمكن جمعها في محبس ذرات معتدلة ودراستها بملاحظة كيفية امتصاصها للحزم الليزرية ذات الترددات المختلفة.

إنتاج متحكم فيه بوساطة الليزر

طوّرت المجموعة ATRAP في نطاق جهودها للحصول على ذرات مضادة حرارتها منخفضة، منظومة يتحكم فيها الليزر لإنتاج هيدروجين مضاد. تتخلص هذه المنظومة من المحبس المتداخل. وبدلاً من ذلك يُحتفظ بالبوزترونات والبروتونات المضادة في بئرين كمونيتين متجاورتين لكنهما منفصلتان *[انظر الإطار في الصفحة 974]*. تنقل سلسلة من التفاعلات بدءاً من حزمة من ذرات السيزيوم المثارة بالليزر، البوزترونات إلى البروتونات المضادة لتكوين الهيدروجين المضاد. وتصمم سلسلة التفاعلات بحيث يتم نقل كمية ضئيلة جداً من الطاقة إلى الذرات المضادة الناتجة.

أجرت المجموعة ATRAP هذه التجربة على مدى ساعات قليلة فقط في نهاية الوقت المتاح لها في عام 2004، ولذلك لم يكن لديها وقت كاف **لأمثلة** optimize الطريقة أو لتجميع عدد أكبر من الذرات المضادة. وبالتحديد تم كشف ثلاثة عشر منها. ويوضح (كبريلس) «أنه يوجد سبب جيد للاعتقاد أن هذه الذرات هي أبرد بكثير جداً من تلك الذرات المنتجة بوساطة محبس بيننغ المتداخل». ولكن الأمر يحتاج إلى عدد أكبر بكثير من الذرات لإثبات هذه الفرضية. وحتى عند ذلك فلا تزال هناك خطوة أخرى ضرورية قبل أن يكون استخدام الذرات المضادة للاختبارات الدقيقة للتناظر CPT ممكناً: تتكون الذرات المضادة في حالات منتفخة مثارة لدرجة عالية (تسمى حالات ريدبرغ Rydberg states) ومن ثم لابد من إزالة هذه الإثارة قبل التمكن من إجراء التحاليل الطيفية العملية.

وفي نهاية عام 2004 نجحت المجموعة ATHENA أيضاً في ضغط بروتوناتها المضادة في عمود رقيق كثيف في مركز محبسها بالضبط. ويمكن لهذا التشكيل أن يكون مفيداً جداً في التجارب المستقبلية التي تشمل محابس مغنطيسية (سوف يُحتاج إليها للحفاظ على ذرات الهيدروجين المضاد).

وفي عمل آخر فحص أعضاء المجموعة ATHENA خصائص عملية إنتاج الهيدروجين المضاد. ووجدوا أنه حتى عندما تكون بوزترونات هم في درجة حرارة الغرفة (300 كلـفن) ينتج عدد من الذرات المضادة يعادل تقريباً تلك التي لدى المجموعة ATHENA عند درجة حرارة التشغيل المعتادة 10 كلـفن. وهذا يعارض أبسط النظريات عن كيفية تكوّن الذرات المضادة، التي تتوقع عدداً من ذرات الهيدروجين المضاد أقل بآلاف بل ملايين المرات. ويعتقد (لاندوا) اعتقاداً قوياً أنه لابد من وجود آلية ما إضافية تساعد على استقرار الهيدروجين المضاد في البلازما الساخنة. (لكن <كبريلس> يشك بشدة في هذا الاستنتاج). فإذا سببت هذه العملية بالفعل تخفيض طاقة الذرات المضادة إلى أدنى مستوى لها، كما هو مطلوب للدراسات الطيفية، فإن هذا الاكتشاف يعتبر أخباراً سارة لهؤلاء الراغبين في اختبار التناظر CPT.

ويتفق كلا الباحثَيْن على أن إنتاج ذرات الهيدروجين المضاد الملائمة للدراسات الطيفية هو التحدي الرئيسي الذي يواجه المجموعتين الآن. ولابد لمثل هذه الذرات المضادة من أن تتصف بالخاصتين التاليتين، ليس فقط أن تكون أبرد من 0.5 كلـفن بحيث يمكن للمحابس المغنطيسية أن تحتفظ بها، ولكن يجب أيضاً أن تكون في حالتها الطاقية الدنيا.

يعمل مبطئ البروتونات المضادة عادة من الشهر 5 إلى الشهر 11 كل عام، ولكنه لن يعمل على الإطلاق عام 2005، إذ تم إغلاق مسرّعات المركز سيرن CERN كإجراء اقتصادي نتيجة لتجاوز الميزانية الخاصة ببناء مصادم الهادرونات الكبير Large Hadron Collider. ويجب على باحثي الذرات المضادة أن ينتظروا حتى الشهر 2006/5 قبل أن يتمكنوا من استئناف معركتهم لإجبار التوأم الشيطاني للهيدروجين على الاستسلام.

المؤلف

Graham p.collins

محرر رئيسي في ساينتفيك أمريكان..

مراجع للاستزادة

Production and Detection of cold Anthydrogen Atoms. M.Amoretti et al. in Nature، vol. 419، pages 456-459; October 3، 2002.

Background-free Observation of cold Antihydrogen with Fieldlonization Analysis of Its States. G. Gabrielse et al. in physical Review Letters، Vol. 89، No. 21، pages 213401-1-213404-4; November 18، 2002.

The Antiproton: a Subatomic Actor with Many Roles. John Eades in CERN Courier، vol. 43، No. 6; july/August 2003. Available online at cerncourier. Com /main/article/43/6/17.

First Measurement of the Velocity of Slow Antihydrogen Atoms. G. Gabrielse et al. in physical Review Letters، vol. 93، No. 7، pages 073401-1-073401-4; August 13،2004.

The ATHENA Web site is at Athena. Web. Cern.ch/Athena/

The ATRAP Wep site is at hussle. Harvard. Edu/-atrap/

Additional information about antimatter and tests of CPT symmetry is online at www.sciam.com/ontheweb.

الألف طريقة وطريقة لقابلية المكاملة (*)

إن المسائل الفيزيائية التي يمكننا حلها حلاً دقيقاً ــ والتي نسميها مسائل قابلة للمكاملة أو قابلة للحل ــ هي مسائل نادرة. وقد استطاع الفيزيائيون الربط بين ظواهر مختلفة بتحويل مسائل معقدة إلى مسائل يمكن حلها. وذلك بفضل الاستفادة من تناظرات خفية.

(D. برنارد) ــ (Ph. دي فرانسسكو)

هل هناك تلميذ لا يشعر بالارتياح عندما يستطيع إيجاد حلّ لمسألة رياضياتية أو فيزيائية؟ وهل هناك فيزيائي لم يحلم بحل المعادلات التي تصف الظاهرة التي يدرسها؟ ذلك صحيح، لكن تجري الرياح بما لا تشتهي السفن؛ إذ إن جلّ المسائل لا تقبل حلولاً صريحة. وهذا لا يرجع إلى ضعف مواهب الأشخاص الذين يبحثون عن تلك الحلول، بل إلى البنية الرياضياتية للمسائل المطروحة التي تجعل الحلّ الوحيد الممكن هو حل تقريبي أو عددي.

هناك عدد قليل من المسائل التي تتمتع بحلول مضبوطة يمكن التعبير عنها بصيغة واضحة ومتماسكة (مثل تلك التي تعبّر عن سقوط جسم في الفراغ)، وهي تسمى مسائل قابلة لحل مضبوطة [1] (نقول أيضاً إنها «قابلة للمكاملة» intégrable) وتخضع في الفيزياء لوضع خاص. إنها مسائل تسمح بالتأكد من صحة قوانين فيزيائية، لأننا نستطيع بوساطة هذه القوانين التنبؤ بدقة بتطوّر نظام عبر الزمن والتحقق من تطابق النتائج مع الدراسة النظرية. لكن السؤال المطروح هو: كيف نتعرّف تلك المسائل القابلة للمكاملة؟

سنرى أن وجود الحلول المضبوطة مرتبط بوجود تناظرات، كما هي حال المسألة المتميّزة لجسمين متآثرين تثاقلياً[2]، التي حلت في القرن السابع عشر. وسنصف بعد ذلك كيف يمكن أن يؤدي البحث عن التناظرات الخفية أحياناً إلى توسيع حقل «قابلية المكاملة» إلى مسائل جسيمات متآثرة، لاسيما في دراسة تغيّرات حالة النظم الترموديناميكية (الحركية الحرارية). وستبيّن أمثلة متعاقبة أن اكتشاف أسباب قابلية المكاملة أقام جسوراً بين العديد من حقول الفيزياء، وحتى الرياضيات، التي كانت تبدو وكأن لا روابط بينها. تلك هي أهمية النماذج القابلة للحل في الفيزياء!

إن أبرز مسألة قابلة للحل بالضبط هي مسألة كبلر Kepler، المتعلقة بحركتي جسمين ضخميْ الكتلة، مثل حالة كوكب مع نجم من نجومه عندما يكونان خاضعين لفعل تجاذبهما التثاقلي. إن «حلّ» المسألة يعني هنا أن معرفة كتلتي هذين الجسمين، وكذا موقعيهما وسرعتيهما الابتدائيتين، تمكّننا من وصف تطوّر موقعي الكوكبين عبر الزمن وصفاً تحليلياً[3] (أي بعبارات رياضياتية متماسكة). من أجل ذلك يكفي تحديد الموقع النسبي لكل من الكوكبين بدلالة الزمن. وتتمثل مسألة كبلر عندئذ في حل ثلاث معادلات تطوّرية[4]، واحدة لكل وسيط من الوسطاء (البارامترات) parameters الثلاثة التي تعيّن هيئة configuration النظام (المسافة التي تفصل الكوكبين والزاويتين اللتين تعينان الاتجاه في الفضاء للقطعة المستقيمة الواصلة بين الجسمين).

لمَ هذا الحل ممكن؟ لقد أثبت الرياضياتي الفرنسي (ز. ليوفيل) في القرن التاسع عشر مبرهنة مهمة تقول: إذا كان عدد المقادير التي يحافظ عليها النظام عبر الزمن تساوي عدد درجات حريّته[5] (أي عدد المتغيرات اللازمة لتحديده) فإننا نستطيع، نظرياً، حل مسألة كبلر حلاً مضبوطاً، أي التعبير عن تطوّرها عبر الزمن تعبيراً صريحاً باستخدام عمليات رياضياتية أوليّة ــ كتبديل المتغيرات واللجوء إلى تكاملات لدوال في متغير واحد ــ ومن ثمّ جاء مصطلح «قابلية المكاملة».

تلك هي حالة مسألة كبلر. ما المقادير التي تتم المحافظة عليها خلال حركة الجسمين؟ تبيّن معادلات الميكانيك المعهود (التقليدي) أن الطاقة الكلية للنظام، وكذا عزمه الحركي الكلي (العزم الحركي لجسيم هو الجداء المتجهي[6] لمتجه موقعه[7] في متجه كمية حركته) يظلان ثابتين عبر الزمن. إن الحفاظ على الطاقة وعلى العزم الحركي ناتج من وجود تناظرات.

(*) هذه ترجمة للمقالة بعنوان: Les mille et une facettes de l'intégrabilité. وقد صدرت في عدد الشهر 2005/10 من مجلة pour la Science الفرنسية، وهي إحدى أخوات العلوم الثماني عشرة التي تترجم مجلة Scientific American.

(1) exactement solubles.

(2) interaction gravitionelle.

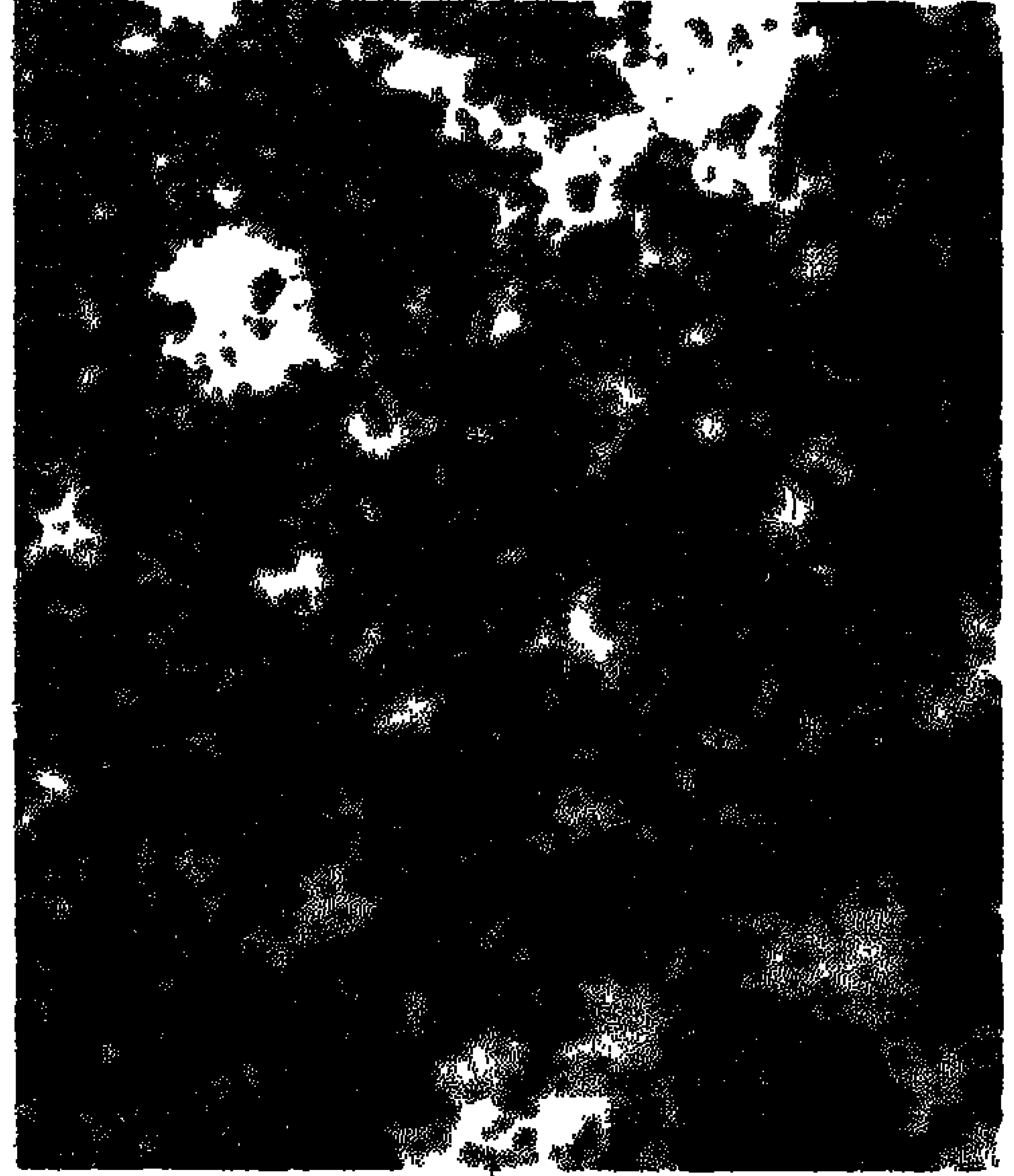
(3) analytique.

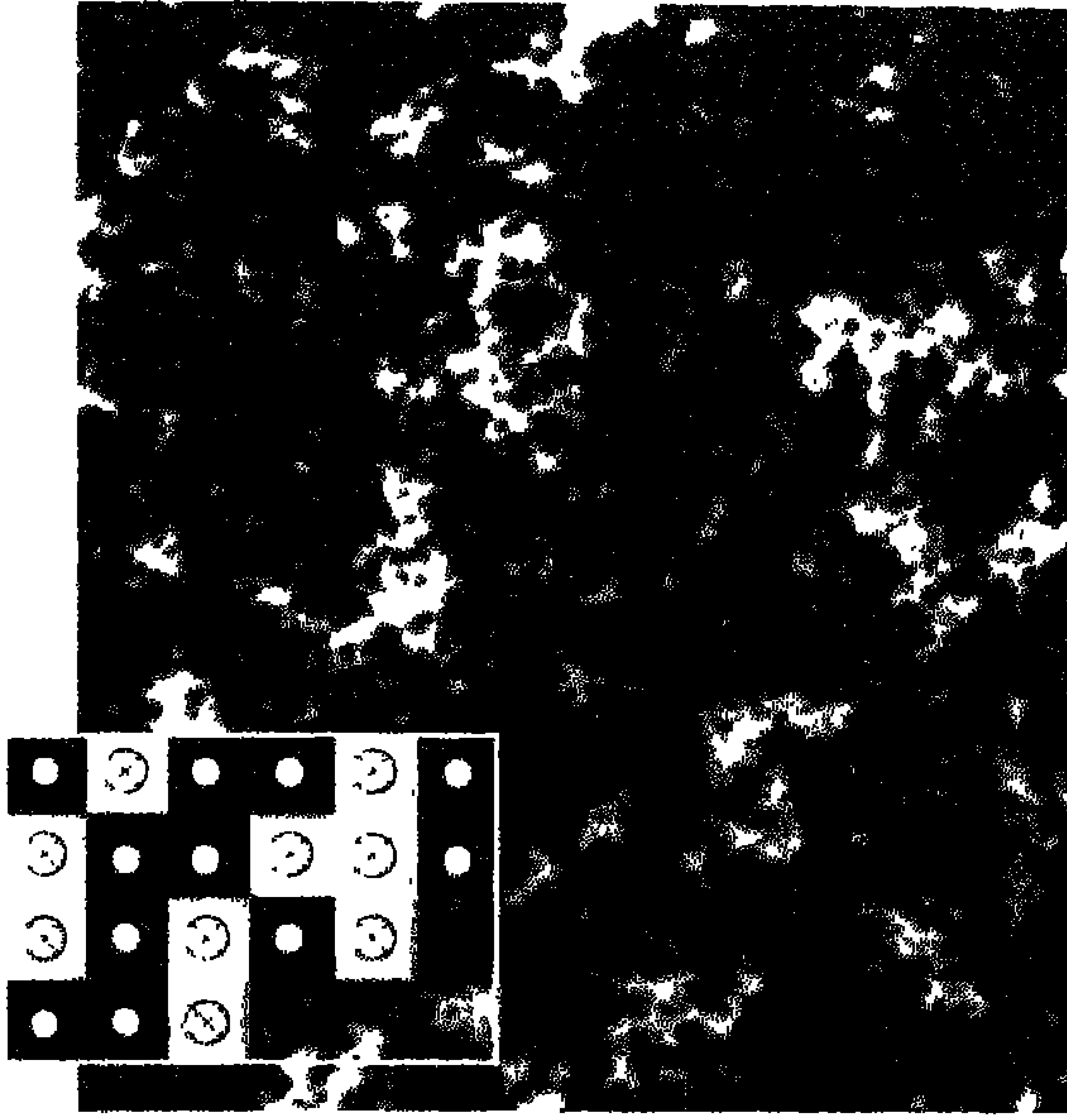
(4) équations d'évolution.

(5) degrés de liberté.

(6) produit vectorial أو الجدار الشعاعي.

(7) vecteur position.





الشكل 1: إن تشكيلات العزوم المغنطيسية لنموذج معطى على شبكة ثنائية الأبعاد، حيث يكون لكل موقع في الشبكة عزم مغنطيسي موجه نحو الأعلى (*باللون الأزرق*) أو نحو الأسفل (*باللون الأصفر*)، تتكون (هذه التشكيلات) من حشود مختلفة الحجوم. عندما تكون درجة الحرارة «حرجة» فإنه يتم الانتقال من حالة ممغنطة (تكون فيها معظم العزوم المغنطيسية موجهة نحو الاتجاه نفسه) إلى حالة غير ممغنطة (تكون فيها للعزوم المغنطيسية اتجاهات عشوائية). وبجوار درجة الحرارة «الحرجة» نلاحظ وجود لاتغير في السلم: عندما نعتبر سلما معينا (*في اليسار*) نشاهد حشودا مختلفة الحجوم، وعندما نجري تكبيرا (بمعامل 2 مثلا، *في اليمين*) فإن النظام يُظهر الهيئة العامة نفسها. يسمح اللاتغير المذكور بحساب دقيق لبعض خصائص النظام الذي نسميه نظاما «قابلا للمكاملة».

وهكذا فإن الحفاظ على الطاقة يعبّر عن أن قوة الجذب التثاقلي لا ترتبط صراحة بالزمن. ونقول عندئذ إن النظام لامتغيّر invariant، أو متناظر بالانسحاب translation في الزمن؛ بمعنى أن تغيير مبدأ الزمن (أي لحظة الصفر) لا ينجم عنه أي تأثير يمكن مراقبته كما أن الحفاظ على العزم الحركي الكلي يرجع إلى التناظر الحاصل بفعل دوران مجمل الجسمين الضخميْ الكتلة؛ لأن القوة التثاقلية بين الكوكبين لا ترتبط إلا بالمسافة التي تفصلهما، وليس بمنحى المستقيم الواصل بينهما. وبعبارة أخرى، فإننا لا نحدث أي تغير إذا أخضعنا مجموعة الكتلتين المتأثرتين لدوران، مهما كانت زاوية هذا الدوران.

التناظرات تؤدي دوراً حاسماً(*)

عندما يتعلق الأمر بمسألة كبلر نلاحظ أن التناظرات ـــ بفعل الانسحاب في الزمن وبفعل الدوران ـــ تكفي للحفاظ على ثلاثة مقادير مستقلة، وهي عدد درجات حريّة النظام؛ ولذا تكون المسألة قابلة للمكاملة.

لقد تمّ حلّ مسألة الجسمين قبل أن يتم تحديد الصلة بين قابلية المكاملة والتناظرات، أو المقادير اللامتغيّرة. لكن المقادير الثلاثة اللامتغيرة المستقلة في مسألة كبلر تضمن إمكانية كتابة الدوال الثلاث المستقلة، التي تصف موقعيْ الجسمين بدلالة الزمن، كتابة صريحة. بمعنى أنه يمكن ردّ المسألة إلى حلّ ثلاث مسائل أحادية الأبعاد (أي بدرجة حرية واحدة) ومستقلة. وقد تم التوصل إلى العلاقة بين التناظرات والمقادير اللامتغيرة في مطلع القرن العشرين وذلك من قبل الرياضياتية الألمانية (E. نوثر).

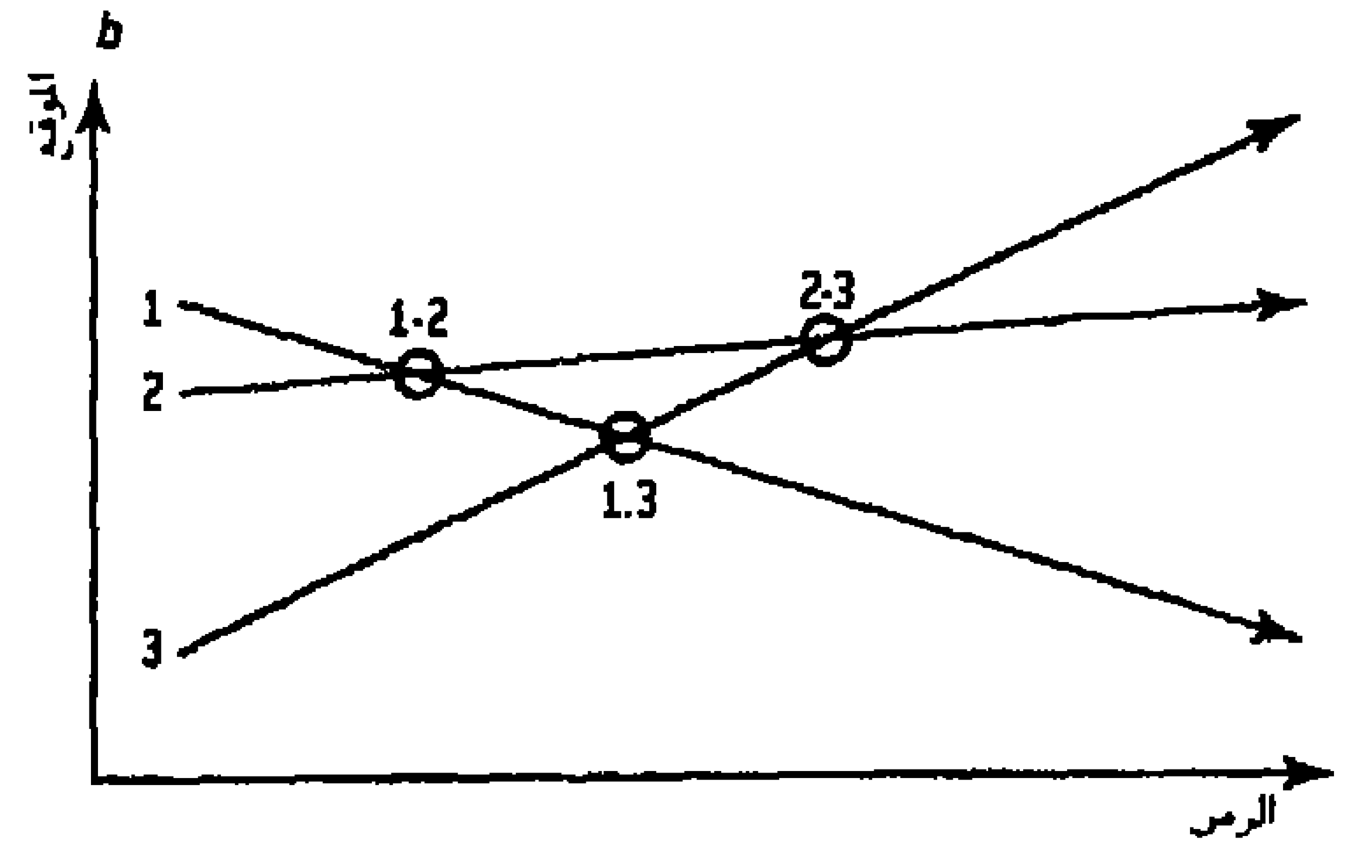
والملاحظ أن مفهوم قابلية المكاملة ينطبق أيضاً على النظم الكمومية (الكوانتية) quantum. فثمة ما يكافئ مسألة كبلر: إنها ذرّة الهيدروجين. في هذه الحالة، يكون الجسمان (بروتون وإلكترون) خاضعين لتفاعل كهرسكوني electrostatic، والمقدار المطلوب تعيينه هو الدالة[8] الموجية، وهي الدالة التي تعبّر عن احتمال وجود الإلكترون في كل لحظة عند كل نقطة من الفضاء. إن الحل الدقيق لهذا النموذج معروف منذ العشرينيات من القرن الماضي. وكما هي الحال بالنسبة إلى مسألة كبلر المعهودة فإن ذرّة الهيدروجين تمثّل ـــ عندما لا نراعي فيها سوى التأثر الكهرسكوني ـــ نظاماً كمومياً قابلاً للمكاملة وذلك بفضل وجود تناظرات كافية.

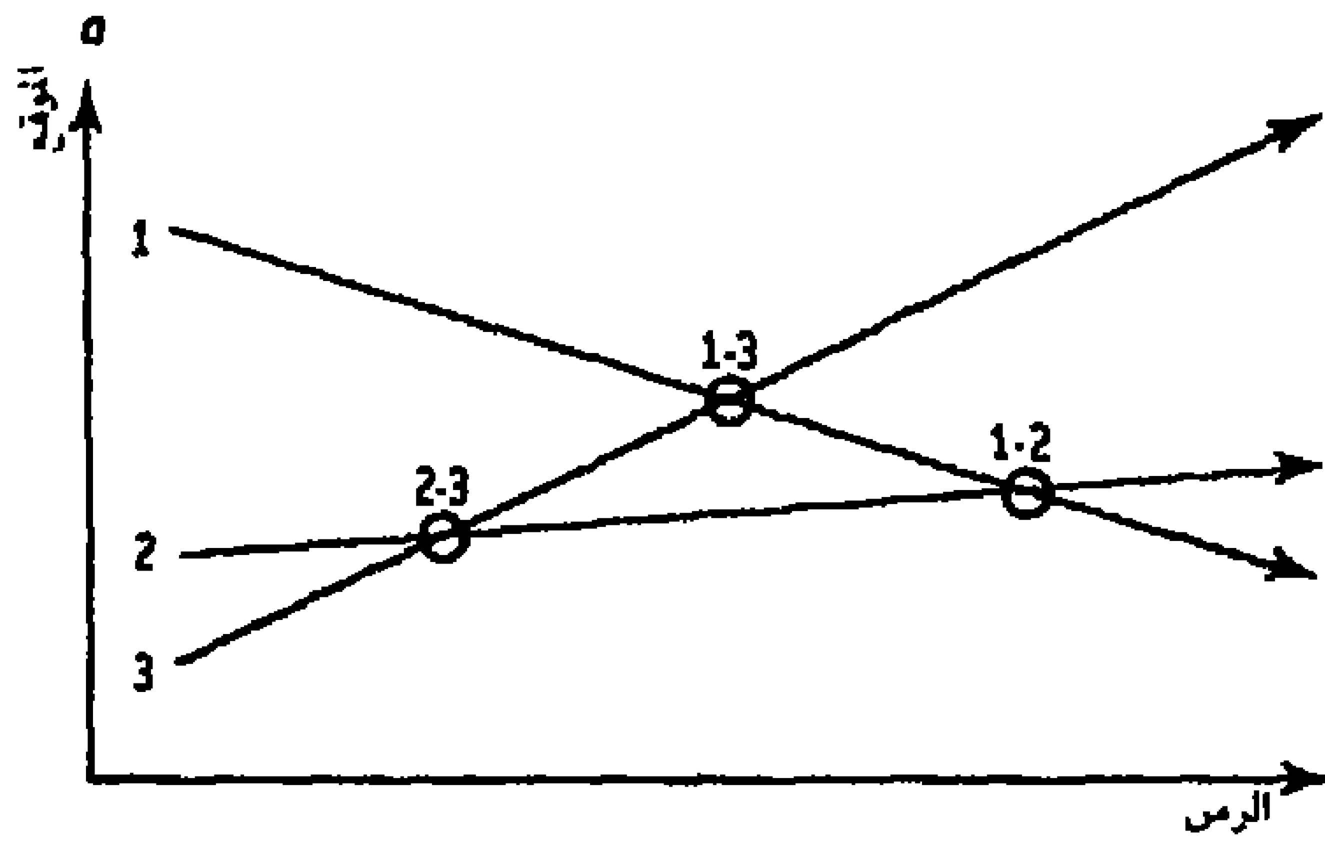
كان عدد الأنظمة القابلة للمكاملة في مطلع القرن العشرين لا يتجاوز عدد أصابع اليد الواحدة. ففي الميكانيك المعهود كان الأمر يتعلق خصوصاً بخذاريف[9] متناظرة إلى حد ما وخاضعة أحياناً لقوة الجاذبية. وفي هذا السياق تجدر الإشارة إلى أن مسألة الأجسام الثلاثة المتأثرة تثاقلياً ـــ التي تبدو من البساطة بمكان ـــ لا يمكن

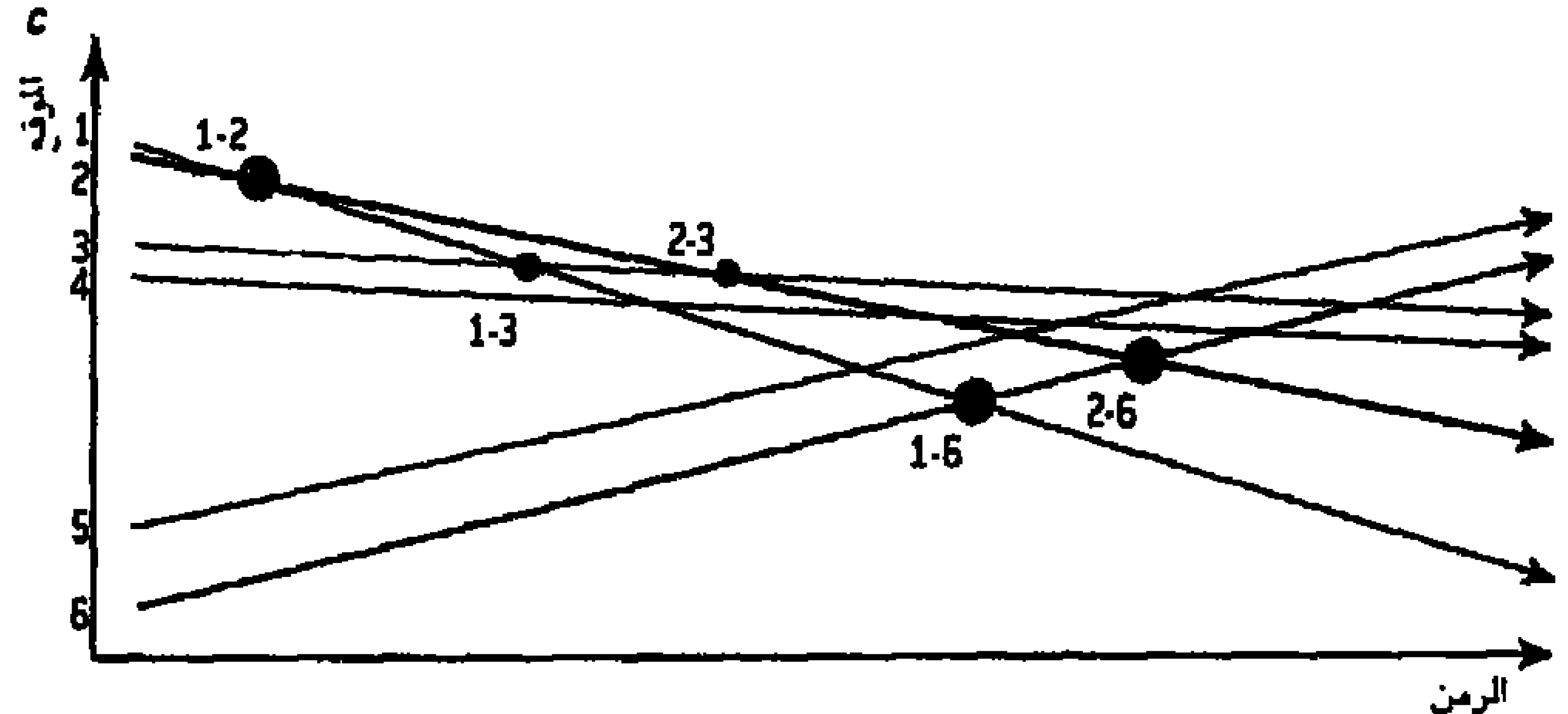
(*) Les symétries jouenet un rôle clef

(8) fonction أو تابع.

(9) toupies ج: خذروف (دوامة أو بلبل).







الشكل 2: عندما تلتقي موجتان منعزلتان فإنهما تتقاطعان من دون أن تتشوها. وهكذا فإننا نثبت أن الحالة النهائية لنظام مؤلف من ثلاث موجات منعزلة، حالة مستقلة عن الترتيب الذي تتم وفقه الاصطدامات (*الشكلان a و b*) وتسمح هذه الخاصية ـ المتمثلة في تناظر مجرد ـ بتحليل تأثر عدد كبير من الموجات المنعزلة (*الشكل c*)، وهي مجموعة اصطدامات مؤلفة من ثلاثة أجسام، بشكل يجعل النظام قابلا للمكاملة. وبذلك نكون قد استخرجنا من بين المسارات الكثيرة (*المبينة في الشكل c*) نظامي اصطدام قابلين للمكاملة مؤلفين من ثلاثة أجسام: تلك المسارات التي تتقاطع عند النقاط 1-2 و 1-3 و 2-3 (*النقاط الزرقاء*)، وعند النقاط 1-2 و 1-6 و 2-6 (*النقاط الحمراء*).

حلّها حلاً مضبوطاً. وكذلك الأمر فيما يتعلّق بالميكانيك الكمومي (الكوانتي) إذ لا يمكن بالضبط تحديد الدوال الموجية للذرة الثانية في التصنيف الدوري للعناصر ــ وهو الهيليوم (نواة وإلكترونان متأثران كهرسكونياً).

يعتبر الفيزيائيون الكون منقوصاً: ذلك أن الوضعيات الحقيقية تؤدي إلى نظم عدد مركباتها يفوق اثنين بكثير. وهكذا فإن جلّ الذرات لها عدد مرتفع من الإلكترونات، ونوَاها تتشكل من عدد مماثل من البروتونات والنيوترونات. والملاحظ أن عدد المركبات في السوائل والغازات كبير للغاية. وعليه فإننا بعيدون عن التفكير في إمكانية تحديد مسارات كلٍّ من المركبات الأولية لمثل تلك النظم. ولذلك ندخل في اعتبارنا متغيّرات جديدة، تسمى متغيرات ماكروسكوبية (عيانيّة) macroscopic (الضغط، درجة الحرارة، المغنطة، ..) للمقادير المحصل عليها وذلك بحساب متوسطات المتغيرات الميكروسكوبية (المجهرية) microscopic للمركبات. وفي هذه الحالة، فإن الحلّ المضبوط لمسألة معيّنة يعني التحديد المضبوط لسلوك المتغيّرات الماكروسكوبية الواحدة بدلالة الأخرى. فالأمر يتعلق هنا مثلاً بتعيين درجة الحرارة التي ينتقل عندها جسم من حالة إلى أخرى (مثل انتقال الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية أو الحالة الصلبة) وذلك بدلالة الضغط أو بدلالة متغيّر آخر ترموديناميّ (حركي حراري).

تنتج قابلية المكاملة ــ في معظم الحالات المدروسة من قبل الفيزيائيين ــ من تناظرات أكثر تعقيداً من تلك التي جئنا على ذكرها حتى الآن. ولنوضّح ذلك من خلال ما يعرف بالسوليتون الهدروديناميّ (الحركي المائي) hydrodynamic soliton. إنها ظاهرة شاهدها في منتصف القرن التاسع عشر المهندس (ج. روسل) وهو يتجوّل، ممتطياً حصانه، على ضفاف إحدى القنوات المائية. لقد شاهد (روسل) أن أمواجاً منعزلة تتشكل في القناة وتنتشر فيها على مسافات كبيرة من دون أن يتغيّر شكلها.

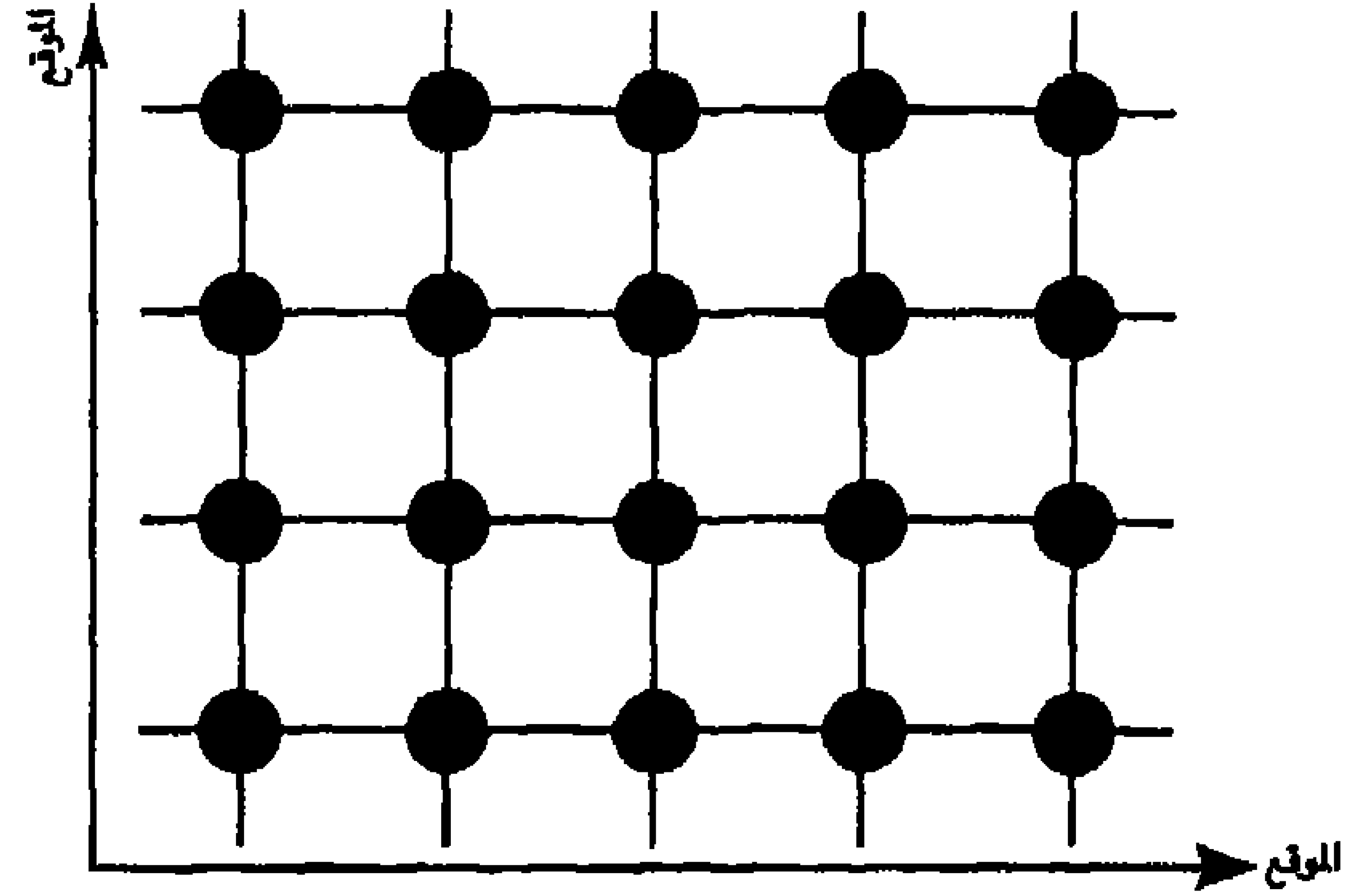
كائنات لا متغيّرة: السوليتونات الهدروديناميّة(*)

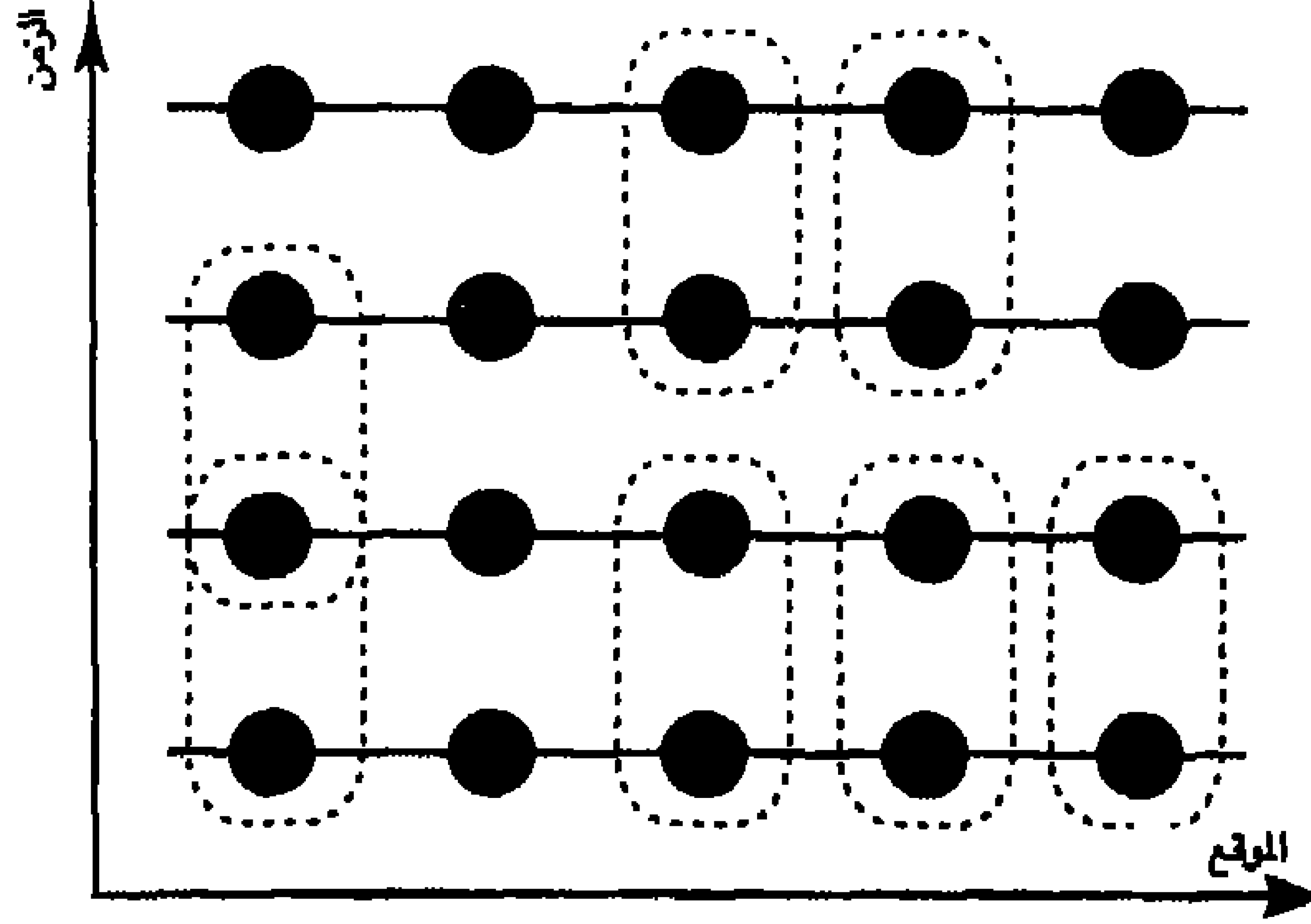
تحكُمُ في هذه الموجات الهدروديناميّة ــ المسماة موجات منعزلة أو سوليتونات ــ إحدى معادلات ميكانيك السوائل التي تمّ البرهان عليها في أواخر القرن التاسع عشر. وكانت تلك المعادلة قابلةً للمكاملة؛ إذ نعرف كيف نحسب بالضبط ملْمَح[10] السوليتون الهدروديناميّ ــ أي ارتفاع سطح الماء عند كل نقطة منه، وكيفية تحديد انتشار الموجة. ومن المذهل أكثر أننا نلاحظ ــ بالمشاهدة والحساب معاً ــ أن موجتين منعزلتين ومتعاكستين في الاتجاه تتقاطعان وتخترق إحداهما الأخرى من دون أن يُحْدِث ذلك تغيّراً في شكليهما. وكل ما نلحظه من تغيّر في آخر المطاف هو بعض التأخر في سرعة الانتشار.

إن ثبات سرعات الموجات يتعارض مع ما نشاهده عند اصطدام جسميْن رخويْن حيث يتمّ خلال الصدمة امتصاص جزء من الطاقة الحركية. أما بالنسبة إلى هذه الموجات، فليس ثمة فقدان للطاقة، بل على العكس فنحن نشاهد بشفافية جليّة كل موجة واضحة المعالم بالنسبة إلى الأخريات، مع أنه ليس لهذه الموجات بنى صلبة.

(*) Des objets invariants: les solitons hydrodynamiques

(10) profil: المنظر العام.





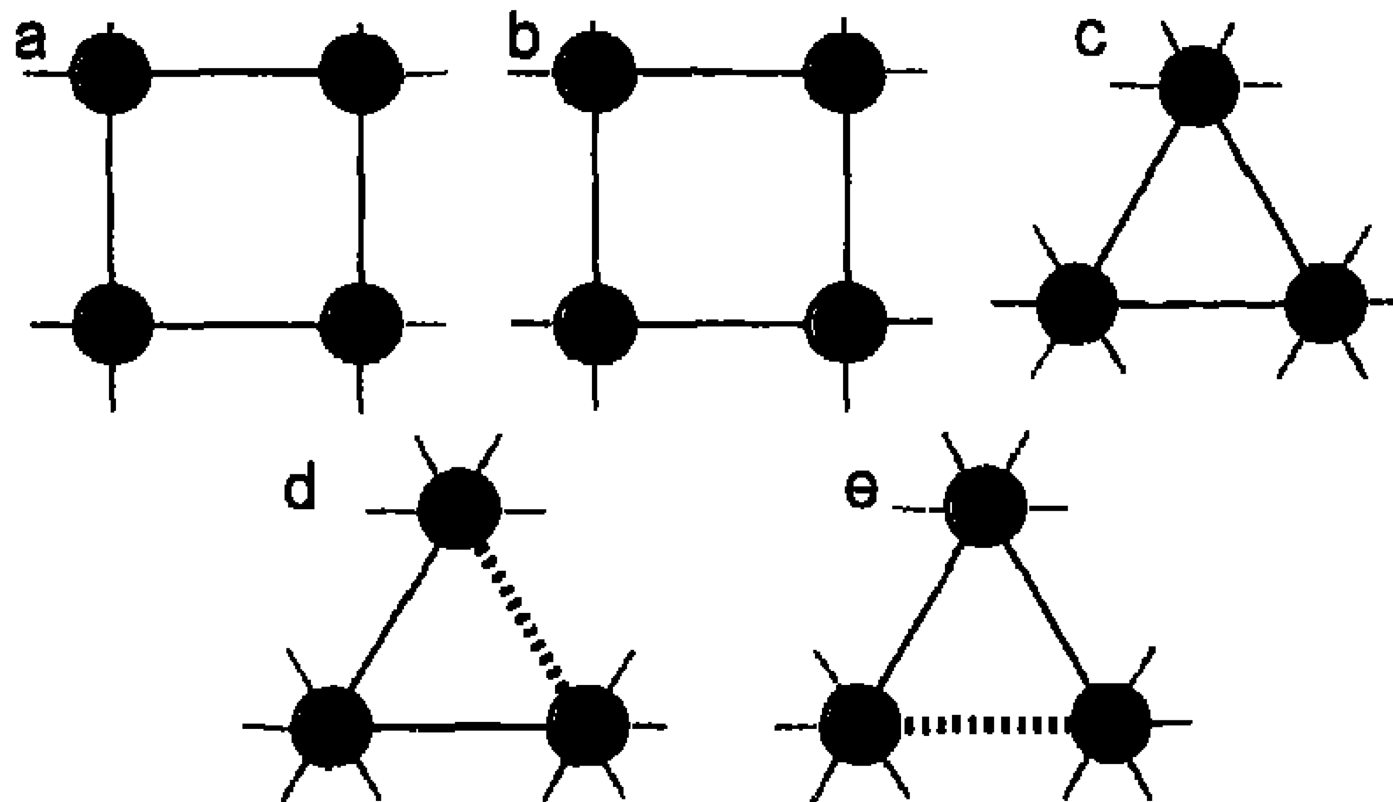
الشكل 3: عندما يتطور نظام احادي الابعاد عبر الزمن ـ كما تتطور مجموعة مصطفة من السپينات حيث يستطيع كل منها تغيير اتجاهه في كل «خطوة» زمنية (الشكل الأيسر) ـ فإن هذا النظام يصبح مكافئاً لنظام ثنائي الأبعاد (الشكل الأيمن) يمكن دراسة خصائصه «السكونية» (اي تلك التي لا تتعلق بالزمن). وبفضل هذا التكافؤ يمكننا تطبيق طرائق مستخدمة لحل مسائل أحادية الأبعاد على نظم ثنائية الأبعاد.

ويعتبر مثال الموجات المنعزلة مثالاً بنّاءً لسببين: أولهما تبيانه إمكانية أن تكون مسألة قابلة للمكاملة على الرغم من كونها موصوفة بمعادلة معقدة وليس فيها تناظر ظاهري. ثم إن المثال يوضّح أن قابلية مسألة للمكاملة تؤدي إلى ظهور خصائص جماعية بالغة الأهمية. لنكرّر مجدداً أن خضوع سوليتون لاصطدام لا ينجم عنه سوى تأخر في انتشار الموجة. وإذا ما قدّمت عدة سوليتونات من أية جهة من قناة، كلّ منها بسرعة وسعة amplitude معينتيْن، فإن الحالة الإجمالية للنظام (بعد مختلف الاصطدامات) لا تتعلق إلا بالحالة الابتدائية للنظام (أي حالته قبل حدوث أول اصطدام)، وهي لا تتعلق بتسلسل التأثرات المتعاقبة. وعليه ينبغي إضافة هذه الخاصية ــ المتمثلة في اللاتغيّر بمبادلة permutation الاصطدامات ــ إلى قائمة الخصائص من هذا القبيل ــ مثل اللاتغيّر بالدوران ــ التي يحيط بها المختصون في المسائل القابلة للمكاملة.

ويمكن نقل فيزياء الموجات المنعزلة الهدرودينامية، وكذا تناظرها، إلى مسائل فيزيائية أخرى. لنعتبر مثلاً حالة موصّل كهربائي أحادي الأبعاد يضم حشداً من الإلكترونات. إذا كان هناك إلكترون واحد، فإن معادلة شرودينگر Schrödinger ــ التي تمثل معادلة أساسية في الميكانيك الكمومي لأنها تتحكم في تطور الدالة الموجية ــ تتنبأ بانتشار الدالة الموجية للإلكترون عبر الزمن: بمعنى أن الدالة لا تحافظ على شكلها. لنتخيّل الآن وجود عدد كبير من الإلكترونات، ولنفترض أنها لا تتأثر فيما بينها إلا عند نقطة التقائها، وهنا تتنافر بشدة. ضمن هذه الشروط، فإن الدالة الموجية الكلية للنظام ذي الطاقة المثبتة ــ وهي تكافئ مُركب دوال موجية لجسيم واحد ــ تحافظ على بنيتها عبر الزمن شأنها في ذلك شأن موجة منعزلة.

وهكذا فإن اللاتغيّر بمبادلة الاصطدامات ينتقل أيضاً إلى هذا النظام المؤلف من جسيمات كمومية متأثرة عند نقاط تماسها. ماذا يحدث عندما يقع اصطدام بين جسمين تابعين لنظام كمومي قابل للمكاملة؟ نلاحظ ــ كما هي الحال بالنسبة إلى السوليتونات المعهودة ــ أن ملامح الدوال الموجية تُحفّظ خلال الاصطدامات، وأن التأثير الوحيد لتلك الاصطدامات هو تأخر محتمل مقارنة بالانتشار الحرّ (أي الانتشار من دون اصطدامات). ومن ثمّ نثبت أن ترتيب وقوع الاصطدامات في النظام ليس له أهمية ذات شأن. والتأخرات المتراكمة وحدها هي التي لها أهمية. وكما هي الحال بالنسبة إلى السوليتونات الهدرودينامية، فإن قابلية المكاملة لهذه المسألة ناجمة عن خاصية اللاتغيّر بمبادلة الصدمات بين الجسيمات. لذا باستطاعتنا استنتاج جميع خصائص النظام انطلاقاً من وصف الصدمات بين جسيمات ثلاثة *[انظر الشكل 2]*.

إننا لم نتطرق حتى الآن إلا لأنظمة أحادية الأبعاد ــ وهذا إما لكونها هكذا بشكل صريح، وإما لأن التناظرات كانت تسمح باختزال ضمني لمسألة متعددة الأبعاد فتردّها إلى عدة مسائل مستقلة أحادية الأبعاد. والجدير بالذكر هنا أنه لا توجد مبرهنة تشير إلى أن المسائل الأحادية الأبعاد هي المسائل الوحيدة القابلة للمكاملة. لكن الواقع ينبئنا بأن حل المسألة يزداد تعقيداً بقدر تزايد عدد أبعادها.



ويمكن الانتقال من حالة بُعْد واحد إلى حالة بُعْدين باعتبار أن جملة أحادية الأبعاد تتطور عبر الزمن تمثل نظاماً سكونياً ثنائي الأبعاد. لنلجأ مرة أخرى إلى المقارنة وذلك كما فعلنا لدى الانتقال من مسألة هدروديناميةٍ إلى مسألة جسيمات كمومية متأثرة. فعندما أشرنا إلى حالة الإلكترونات المتحركة على مستقيم كنا نريد وصف تطوّر مواقعها (أو بالأحرى، احتمال وجودها) عبر الزمن. لننظر إلى هذا النظام من زاوية أخرى. تكون الإلكترونات في لحظة معينة في هيئة ما تحددها مواقعها أو تحددها متغيرات أخرى. وفي اللحظة التالية تتغيّر هذه الهيئة، وهكذا دواليك. لنتخيّل الآن أننا وضعنا هذه «اللحظات» جنباً إلى جنب. يمكن أن نعتبر من الناحية النظرية بأننا تحصلنا بذلك على نظام سكوني ذي بعدين *[انظر الشكل 3]*.

من حالة بُعد واحد إلى حالة بُعْدين(*)

يتمثّل تغيير وجهة نظرنا للمسألة في اعتبار الهيئات configurations المختلفة لنظام أحادي الأبعاد على فترة زمنية معينة بمثابة مجموعة هيئات سكونية لنظام ذي بعدين في لحظة واحدة. وهكذا نلْمَح كيف يمكن أن تعمَّم الطرق المطبقة على الأنظمة الأحادية الأبعاد القابلة للمكاملة لتشمل دراسة الظواهر السكونية ذات البعدين.

غير أن ما يشغل بال الفيزيائيين في كثير من الحالات هو الخصائص السكونية للنظام. ذلك ما نلحظه في الترموديناميكية، وفي الفيزياء الإحصائية، حيث يتركز اهتمامنا على تغيرات حالة جسم بدلالة درجة الحرارة أو الضغط أو حقل مغنطيسي خارجي أو مقدار فيزيائي آخر. إن نمط النماذج المستخدمة من قبل المختصين في الفيزياء الإحصائية هو نموذج آيزنغ Ising، الذي أدخله الفيزيائي الألماني (W. لنز) عام 1920 ثم واصل البحث فيه تلميذه (E. آيزنغ). ويتمثل النموذج في شبكة نقاط موزّعة بصفة دورية نضع فوقها عزوماً مغنطيسية، المكافئ الميكروسكوبي لمغنطيسات صغيرة. ومن حيث المبدأ، يمكن أن تكون لهذه الشبكة أبعاد فضائية بالقدر الذي نريد، كما أن شكلها الهندسي يمكن أن يكون كيفياً. وفي أبسط الحالات، التي تفيد مثلاً في نمذجة بلّوْر مغنطيسي، نجد أن الشبكة مكعبة cubic والعزوم المغنطيسية تمثّل سبين spin (أي العزم المغنطيسي الذاتي intrinsic) ذرّات الشبكة البلّورية. إضافة إلى ذلك، فإننا نفترض أن العزوم المغنطيسية لا تأخذ سوى قيمتين متعاكستين في الاتجاه، وأنها لا تتأثر إلا مع أقرب جيرانها.

نقول عن التآثر إنه مغنطيسي حديدي إذا مال كل سبينيْن متجاوريْن إلى التوجه نحو الاتجاه نفسه. وعليه نجد في حالة انخفاض درجة الحرارة ــ عندما تكون التقلّبات الحرارية ضعيفة ــ أن عدداً كبيراً من السبينات يتجه نحو الاتجاه نفسه: ذلك أن هناك مغنطة شاملة للمادة المستعملة. وعندما تكون درجة الحرارة المطلقة منعدمةً فإن جميع السبينات تركُن في الاتجاه نفسه وتكون المغنطة أعظمية. وعلى العكس من ذلك، عندما تكون درجة الحرارة مرتفعة فإن التقلّبات الحرارية تتغلب على التآثرات المتبادلة: يكون للعزوم المغنطيسية اتجاه عشوائي وتكون المغنطة الشاملة الناجمة عنها معدومة. وهكذا عندما ترتفع درجة الحرارة فإن طور phase النظام يتغيّر، حيث ينتقل من طور ممغنط إلى طور غير ممغنط.

يسمح نموذج (آيزنغ) ومشتقاته بوصف مختصر لبعض نواحي عدد كبير من الظواهر: من تغيّر الأطوار المغنطيسية إلى تآثرات الجسيمات الأولية مروراً بالتحول سائل ــ غاز. لنركّز الآن على الحالة ذات البعدين. فبفضل التشابه القائم بين نظام سكوني ذي بعدين ونظام أحادي الأبعاد يتطوّر عبر الزمن يمكن القيام بحساب مضبوط لنموذج (آيزنغ) في حالة بعدين، وكذا حساب متغيرات ترموديناميةٍ أخرى. كان هذا الحلّ المضبوط عملاً رياضياتياً بالغ الأهمية، أنجزه عام 1944 الفيزيائي النرويجي (L. أونساجر)، وذلك بعد أكثر من عشرين سنة من تاريخ إدخال نموذج (آيزنغ).

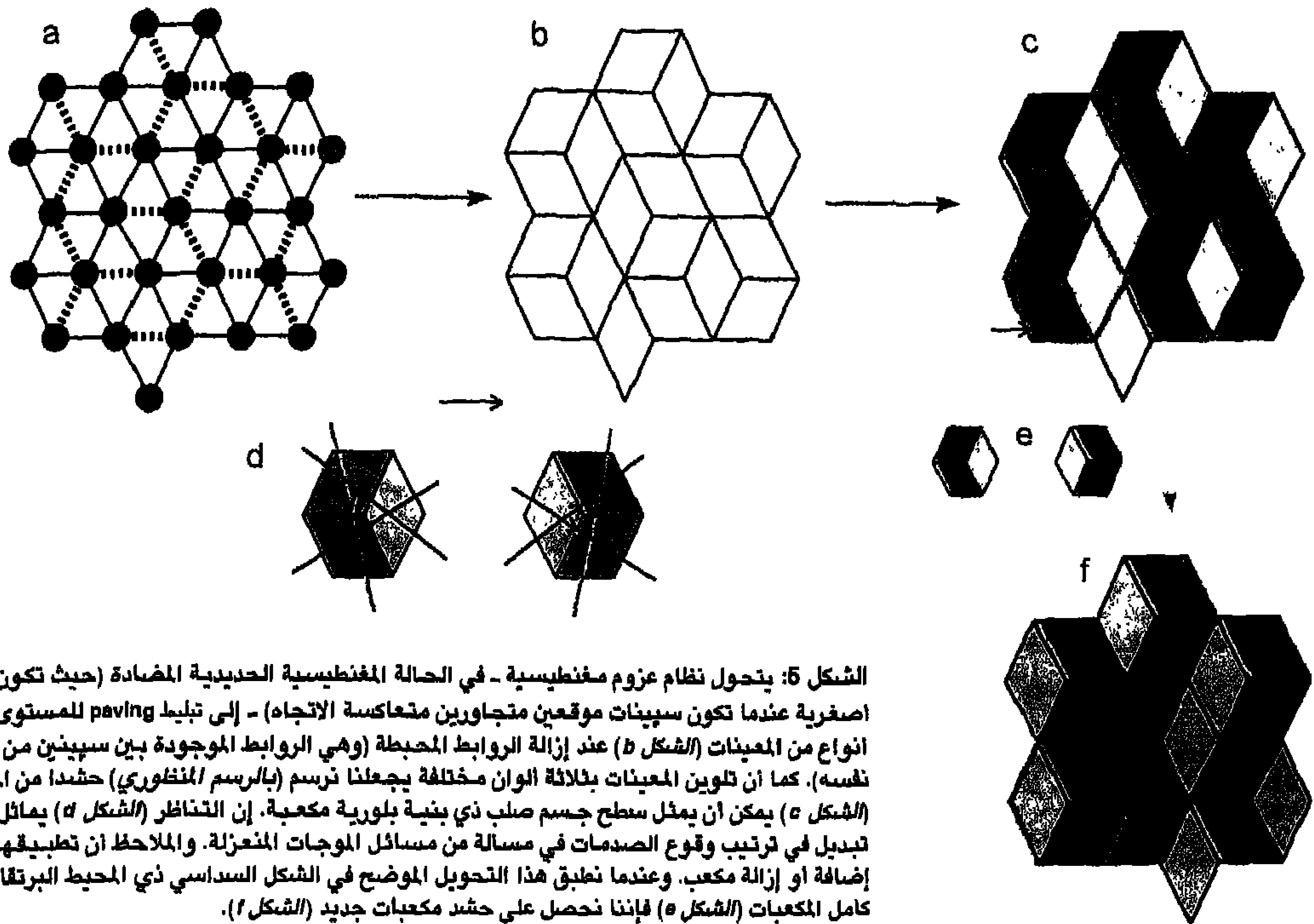
نموذج (آيزنغ)، نموذج مثالي للفيزياء الإحصائية(*)

يمكن بصفة عامة، في حالة بعدين، إنشاء نماذج قابلة للمكاملة لوصف ظواهر جماعية تؤدي إليها التآثرات الميكروية للجسيمات. ومن أبسط صيغ نموذج (آيزنغ) نموذجه المغنطيسي الحديدي المضاد antiferromagnetic حيث يساعد التأثُر المبادل على وجود اتجاهين متعاكسين لعزمين مغنطيسيين متجاورين، وليس مساعدة الاتجاهات المتطابقة، كما هي حال النموذج المغنطيسي الحديدي. وهكذا نلاحظ في حالة شبكة مربّعة أن الحالة الأساسية ــ أي حالة الطاقة الأصغرية ــ لمجموعة العزوم المغنطيسية المعدومة الحرارة تمثّل بنية شبيهة برقعة الشطرنج: كل سبين محاط بسبينات اتجاهها معاكس لاتجاهه.

إن الوضع يزداد تعقيداً إذا ما عرّفنا النموذج على شبكة ذات هندسة مختلفة: مثلاً، شبكة مثلثية. نجد في هذه الهندسة أن كل عزم مغنطيسي قريب من ستة جيران *[انظر الشكل 4]*. عندما تكون درجة الحرارة جد منخفضة فإن عدد ثنائيات العزوم المغنطيسية المتجاورة والمتجهة في اتجاهات متعاكسة ينبغي أن يكون أعظمياً. نقول عن ثنائية سبينين متجاوريْن متجهيْن باتجاه واحد إنها مُحْبَطة frustrated إلا أننا نرى بسهولة في حال شبكة مثلثية أن هناك ثنائيتيْن فقط من بين ثلاث يمكن أن تمثّلا معاً روابط ملائمة، أي سبينات متضادة التوازي antiparallel.

(*) De une à deux dimensions.

(*) Le modèle d'Ising ,archétype de la physique statistique.



الشكل 5: يتحول نظام عزوم مغنطيسية ـ في الحالة المغنطيسية الحديدية المضادة (حيث تكون الطاقة اصغرية عندما تكون سبينات موقعين متجاورين متعاكسة الاتجاه) ـ إلى تبليط paving للمستوى بثلاثة انواع من المعينات (*الشكل b*) عند إزالة الروابط المحبطة (وهي الروابط الموجودة بين سبينين من الاتجاه نفسه). كما أن تلوين المعينات بثلاثة ألوان مختلفة يجعلنا نرسم (*بالرسم المنظوري*) حشداً من المكعبات (*الشكل c*) يمكن أن يمثل سطح جسم صلب ذي بنية بلورية مكعبة. إن التناظر (*الشكل d*) يماثل إجراء تبديل في ترتيب وقوع الصدمات في مسألة من مسائل الموجات المنعزلة. والملاحظ أن تطبيقها يكافئ إضافة أو إزالة مكعب. وعندما نطبق هذا التحويل الموضح في الشكل السداسي ذي المحيط البرتقالي على كامل المكعبات (*الشكل e*) فإننا نحصل على حشد مكعبات جديد (*الشكل f*).

وفي نموذج المغنطيسية الحديدية هناك حالة واحدة مستقرة الطاقة في درجة حرارة منخفضة: إنها الحالة التي تكون فيها العزوم المغنطيسية متجهة في الاتجاه نفسه. أما في حالة المغنطيسية الحديدية المضادة فيوجد عدد من حالات التوازن يساوي عدد إمكانيات ترتيب ثنائية العزوم المغنطيسية المحبّطة وغير المحبّطة على الشبكة. وعندما تكون درجة الحرارة منعدمة، فإن نموذج المغنطيسية الحديدية المضادة يقبل المكاملة. دعنا نحاول إدراك السبب. لنبدأ بإثبات أن هذا النموذج للمغنطيسية المحبّطة يكافئ مسألتَيْن أخريَيْن. من أجل ذلك نزيل الروابط المحبّطة، أي روابط الشبكة التي تصل عزوماً مغنطيسية لها الاتجاه نفسه. وبذلك نشكّل معيّنات rhombuses ـــ تتألف من ثنائيات مثلثية ـــ تشترك في رابط محبط *(انظر الشكل 5)*. إننا أمام مسألة تبليط paving عشوائي للمستوي ذات علاقة بفيزياء أشباه البلّورات. ونستخلص من ذلك أن هناك عدداً من الحالات الأساسية في النموذج الابتدائي المغنطيسي الحديدي المضاد يساوي عدد التبليطات الممكنة للمستوي بوساطة معيّنات من تلك الأنماط الثلاثة.

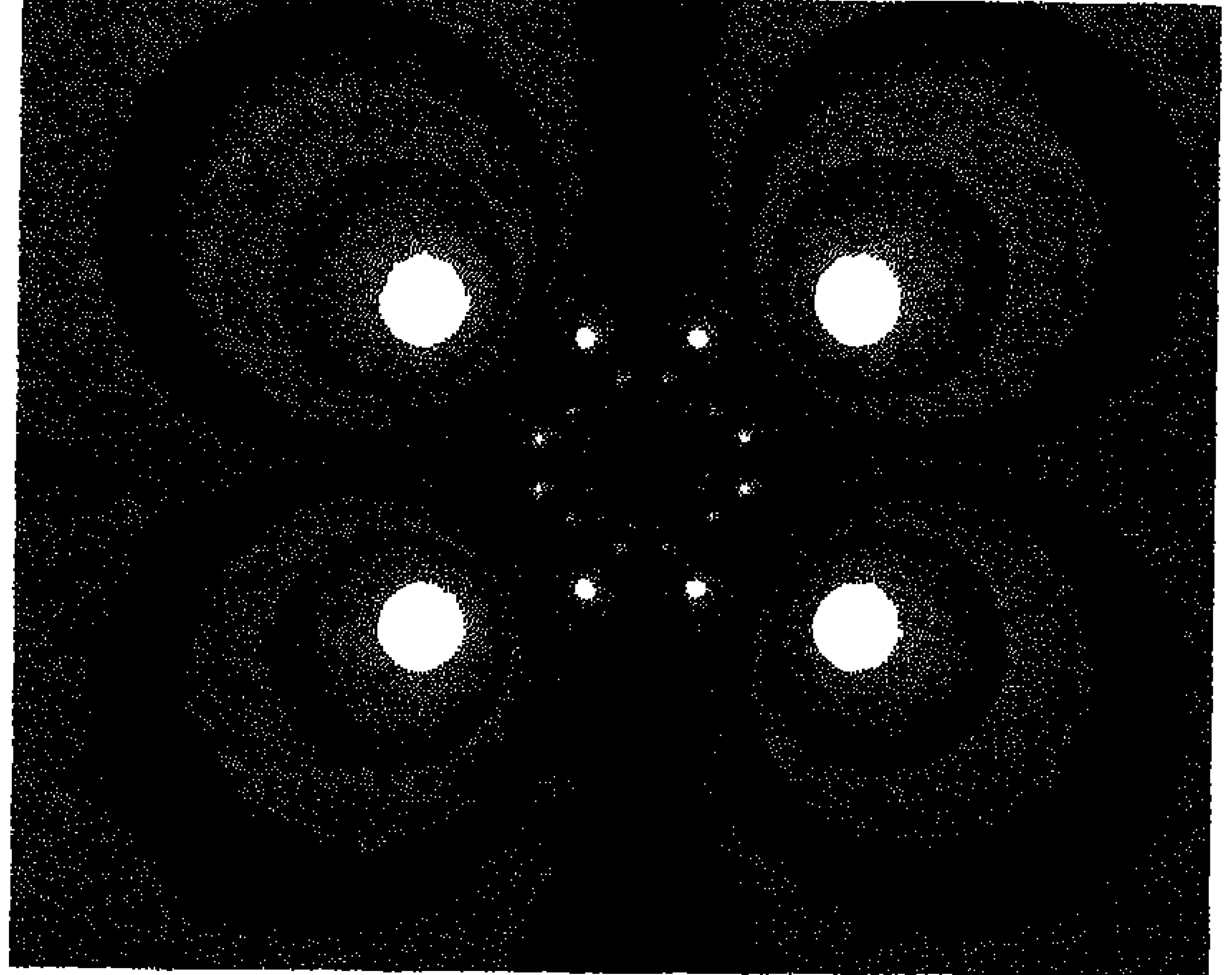
توجد صياغة أخرى للمسألة نفسها تتمثل في استخدام ثلاثة ألوان للتمييز بين أنماط المعينات الثلاثة في التبليط، وهو ما يجعلنا نظهر (في رسم منظوري) تكدّساً ثلاثي الأبعاد يتألف من مكعبات. والواقع أن ذلك التكدس يعرّف سطحاً فاصلاً لبلّورين مكعبي الشبكة، أحدهما مشكّل من تكدّس مكعبات والآخر مما تبقى. وعندما نصيغ بهذا الشكل نموذج (آيزنغ) المغناطيسي الحديدي المضاد فإنه يصبح مثالاً لنموذج يدعى «صلْب على صلْب» solid on solid ويكتب اختصاراً (SOS). وفي هذا الإطار، يمكننا استكشاف جميع الهيئات الممكنة للسطوح الفاصلة، أي تكدّسات المكعبات وذلك بإضافة أو إزالة مكعبات أولية بصورة متعاقبة.

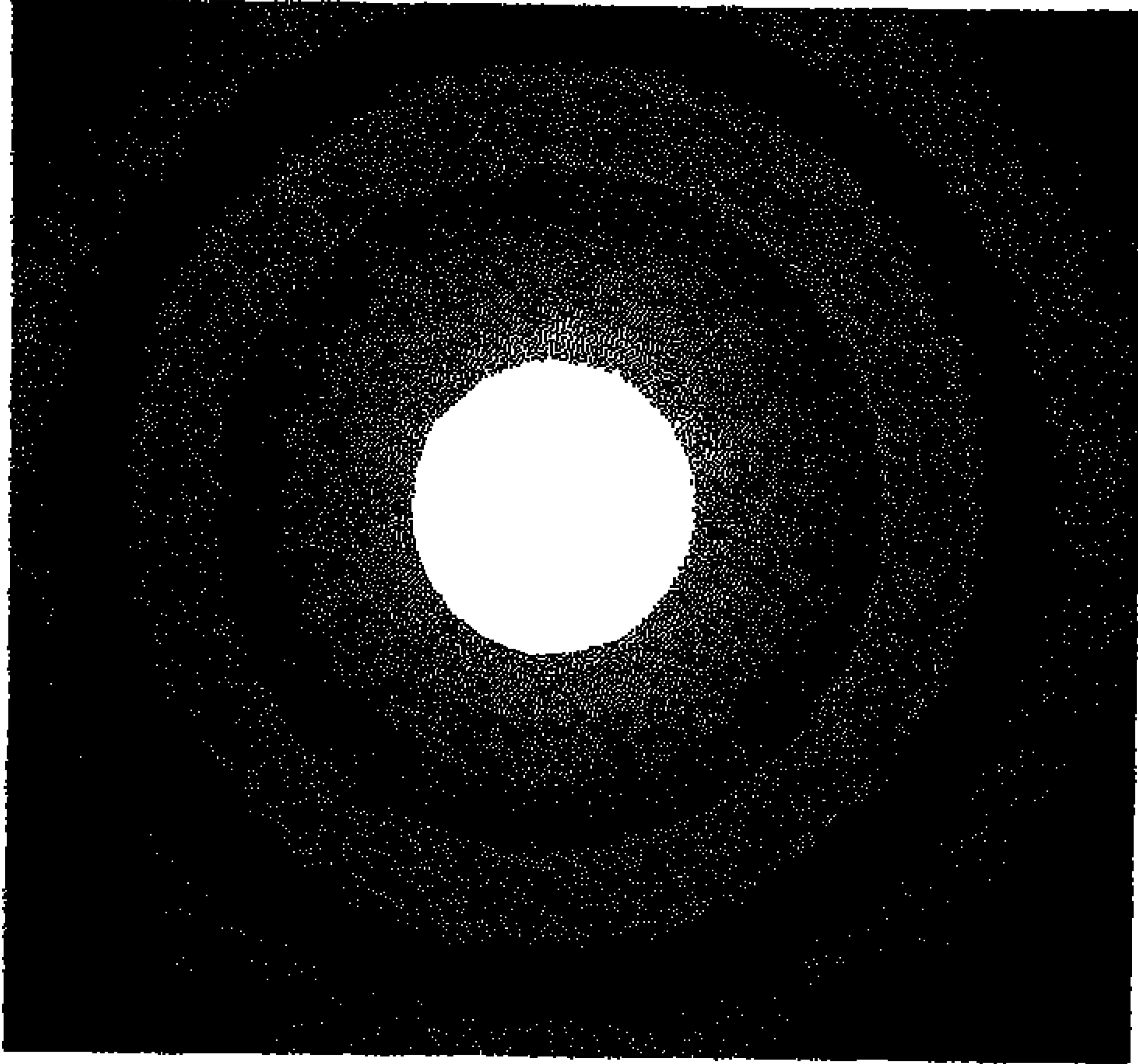
في التمثيل المنظوري نلاحظ أن العملية الأولية الموافقة لإضافة أو إزالة مكعب تتمثل فقط في المبادلة permutation بين المعيّنات الثلاثة داخل الشكل السداسي. ثم إن هذا التحويل الأولي يذكّرنا بالمفهوم الأساسي في قابلية المكاملة: إنه استقلال سيرورات الاصطدامات عن الترتيب الزمني لحدوث تلك الاصطدامات. وعندما نترجم ذلك إلى لغة نموذجنا الإحصائي فإن اللاتغيّر المشار إليه هنا يؤدي إلى إمكانية استنتاج الخصائص الإجمالية للنظام من تعداد هيئات ثلاثة مواقع متجاورة. وفي إطار أعمّ للنظم القابلة للمكاملة يمكن التعبير عن هذا التناظر ـــ الرابط بين الخصائص الإجمالية للنظام ومميّزاته المحلية ـــ بوساطة علاقات رياضياتية، تدعى علاقات يانغ-بكستر yang-Baxter، كان قد أدخلها في أواخر الستينيات من القرن الماضي الفيزيائي الصيني (N.Ch. يانغ) والفيزيائي الأسترالي (R. بكستر).

التنوّع الموحّد(*)

تسمح قابلية المكاملة بإقامة روابط بين ظواهر فيزيائية متنوعة إلى حد كبير. وهكذا نلاحظ في نموذج موضّح على شبكة أن المركّبات الواقعة في عُقَد الشبكة تتأثر وفق قواعد

(*) La diversité unifie.





الشكل 6: نعتبر فسيفساء دورية تغطي المستوي مكوّنة من دوائر متمركزة (*الشكل الأيسر، الخلية الأولية*)، ثم نطبق عليها التحويل المطابق $z\to 1/z$ الذي يحول كل نقطة (x,y) إلى النقطة $[x/(x^2+y^2), -y/(x^2+y^2)]$. عندئذ نلاحظ أن مظهر الفسيفساء يتغير فعلى سبيل المثال تصبح الدوائر غير متمركزة؛ لكنها تتحول إلى دوائر. إن هذه الخاصية لامتغيرة بالنسبة إلى التحويل. يسمح وجود اللامتغيرات للفيزيائيين بتصنيف نظم فيزيائية في الصنف نفسه في حين أنها قبليا مختلفة.

يمكن للفيزيائي اختيارها بالشكل الذي يريده. وحسب التآثر المختار، فإن خصائص النظام يمكن أن تكون جدّ مختلفة. فعلى سبيل المثال نلاحظ في نموذج التبليط بوساطة المعيّنات الوارد آنفاً أن بعض الاختيارات للتآثرات المحلّية تضمن ارتباط توجيه أي معيّن بالمعيّنات التي تفصلها عنه مسافات كبيرة جداً. ومن ثمّ يحدث أحياناً أن تكون المسافات المميّزة التي تؤثر فيها هذه الارتباطات، مسافات تقارب في مقاديرها حجم النظام بكامله. في هذه الحالة يكون الحديث عن نظم حرجة. ولنظم كهذه، لا تؤثر كثيراً التفاصيل على المستوى المحلي في الخصائص الإجمالية أو الجماعية. وفي النموذج SOS مثلاً، نستطيع أن نعوّض تكدّس المكعبات الصغيرة بسطح متصل من دون أن نفقد معلومات مفيدة في موضوع عرض المسألة ــ كما لو لاحظنا الوضع من بعد إثر إزالة تفاصيل الحالة الابتدائية.

وهكذا، وعلى ضوء ما ذكرنا آنفاً، فإن ربط التفاصيل الميكروية للنموذج بالطبيعة «الحرجة» للنظام، يضمن تعادل النظر مجهرياً لجزء من النظام مع النظر إلى النظام بكامله *(انظر الشكل 1)*. وفي هذه الحالة نتحدث، على اللاتغيّر بتبديل السلم. وفي الحالة الخاصة للنظم الثنائية الأبعاد، يؤدي هذا اللاتغير إلى لا تغيّر إثر التحويلات المطابقة[11] المحلية، أي تلك التحولات التي كان من المفترض أن تتغير تبعاً لتغيّر السلم من نقطة إلى أخرى من نقاط النظام. تلك هي الفكرة التي استغلها عام 1984 الباحثون السوفييت (A. بلافين) و(A. بولياكوف) و(A. زمولودشيكوف) كي يرسوا أسس اللاتغيّر المطابق الثنائي الأبعاد[12].

اللاتغير وقابلية المكاملة(*)

يعتبر اللاتغيّر مؤشراً ينبئ بقابلية تلك النظم للمكاملة. وقد سمح ثراء بنية اللاتغيّر المطابق بفرز وتصنيف مختلف السلوكيات الحرجة التي يمكن أن تظهر في النظم الثنائية الأبعاد ذات التآثر المحلي (أي حيث لا تتآثر سوى المواقع المتجاورة). كما مكّن أخيراً من وضع جدول شبيه بجدول (مندلييف)يبرز الظواهر الجماعية لتلك النظم. وينبغي أن ندرك هنا أن كل عنصر من الجدول يوافق العديد من النظم على شبكة مستوية تشترك في كثير من السلوكيات الجماعية الحرجة: تسمى هذه العناصر صفوفاً شمولية. فعلى سبيل المثال، نلاحظ أن جميع نماذج (آيزنغ) المغنطيسية الحديدية الثنائية الأبعاد تنتمي إلى صف شمولية واحد، وذلك مهما كانت الشبكة المستوية المختارة. وعلى العكس من ذلك، فقد سبق أن رأينا أن الحالة المغنطيسية المضادة أقل «شمولية» لأنها مرتبطة ببنية الشبكة: نلاحظ أن بعض الأشكال الهندسية تؤدي إلى إحباط ثنائيات السبينات. لكن هذه الحالة التي تُطرح في كثير من المسائل الفيزيائية تسمح ببلوغ صفوف شمولية أخرى في الجدول المذكور. من جهة أخرى، فإن اللاتغيّر المطابق وجد تطبيقات حديثة تسمح بنمذجة مواد جديدة ذات أحجام نانومترية[13] ومن أجلها تم تبني وصف شبه أحادي الأبعاد.

وخلال العشرين سنة الأخيرة اكتسبت النظم القابلة للمكاملة، بفضل ثرائها البنيوي، مكانة مرموقة في الرياضيات والفيزياء. وكان ذلك قد بدأ باكتشاف صلة بين مفاهيم قابلية المكاملة ونظرية الجبور algebras غير

(11) conform.

(12) l'invariance conforme bidimensionnelle

(*) invariance et intégrabilité

(13) النانومتر: وحدة قياس طول تساوي جزءاً من بليون من المتر. وعلى سبيل المثال فإن سمك شعرة من شعر الإنسان يراوح بين 50 ألف و100 ألف نانومتر.

التبديلية المرتبطة بتباديل permutations مجموعة أشياء. ذلك أن الرابط بين اصطدامات N جسيماً وتباديل N جسيماً يتمثّل في النظر إلى العناصر التي تجري عليها التبديل كأنها الجسيمات نفسها، علماً بأن ترتيب مواقع الجسيمات يتبادل خلال كل اصطدام.

توفّر عناصر زمرة group التباديل الحل الأبسط لعلاقات يانغ-بكستر، كما أنها توافق جسيمات من دون تأثر. أما إذا كانت الجسيمات متأثرة فلا بدّ من إجراء تعديل في صيغة الحل. وقد أثبتت الدراسة العامة لحلول معادلات يانغ-بكستر أنها دراسة مثمرة. ذلك أنها أدت في الرياضيات إلى ميلاد نظرية الزمر الكمومية التي أدخلها خلال الثمانينيات من القرن العشرين الروسي (V. دريز نفلد) (الحائز ميدالية فيلدز لعام 1990) والياباني (M. جيمبو) والبولندي (S. وورونوفيتش) كما أنها أظهرت صلات مع نظرية العُقد استفاد منها بوجه خاص (V. جونس) (الحائز ميدالية فيلدز لعام 1990).

تفرعات عدة في الفيزياء والرياضيات(*)

لقد جرت دراسة النماذج SOS الآنفة الذكر على صعيد آخر حيث تمّ اعتبار شبكات هندساتها تتغير عشوائياً من نقطة إلى أخرى، وذات طبولوجيات مختلفة. وقد اتضح أن هذه النماذج ذات الهندسات المتقلّبة قابلة للمكاملة أيضاً، وأدى حلّها إلى تصنيف تأثيرات هندسة عشوائية في الظواهر الحرجة الثنائية الأبعاد. وبفضل دراسة نماذج مماثلة استطاع (M. كونتســيفيتش) (الحائز ميدالية فيلدز علم 1998، وعضو معهد الدراسات العليا العلمية الفرنسي IHES، الواقع في ضاحية بورس سورإيفيت الباريسية) تجديد الهندسة التعدادية[14]، وهي فرع قديم من فروع الرياضيات يُعنى بتعداد أشياء (مستقيمات، مستويات، إلخ) خاضعة لعلاقات ذات صلة بتقاطعاتها. إضافة إلى ذلك، فإن هذه النماذج غالباً ما تُعتَبر كصياغات أولية لنظريات الأوتار التي تدعي أنها توحّد بين نظرية النسبية العامة والنظرية الكمومية.



وهكذا فإن دراسة النظم القابلة للمكاملة وعلاقات يانغ-بكستر تشعّبت اليوم وتولدت منها تفرعات عدة في الفيزياء والرياضيات. فعالم قابلية المكاملة، عالم شبيه بنظام بيئي، توسّع بشكل معتبر مقتحماً فروعاً فيزيائية ورياضياتية بكاملها فصارت جميعها تشكّل اختصاصاً جديداً هجيناً ـ يعيد النظر في مفاهيمه حرفياً من موضوع إلى آخر، مقيماً بذلك جسوراً بين حقول علمية لا صلة بينها قبلياً[15].

المؤلفان

Denis Bernard – philippe di Francesco

(برنارد) مدير أبحاث لدى المركز القومي للبحث العلمي الفرنسي CNRS. فاز عام 2004 بالميدالية الفضية لهذا المركز. (دي فرنسسكو) كان أستاذ رياضيات في جامعة شبيل هيل بالولايات المتحدة الأمريكية، وهو فيزيائي لدى هيئة الطاقة الذرية الفرنسية. يعمل المؤلفان الآن في قسم الفيزياء النظرية بساكلي (فرنسا).

مراجع للاستزادة

O. BABELON، D. BERNARD et M. TALON، introduction to classical integrable system، Cambridge Unieversity Press، Cambridge، 2003.

P. Difracesco، p.mathieu et d. SÉNÉCHAL، Conformal field theory، Springer Verlag، New York، 1997.

(*) Des ramifications nombreuses en physique et en mathématiques

(14) la géométrie énumérative

(15) a priori (التحرير).

المكتبنارات: نجوم فائقة المغنطيسية (*)

بعض النجوم فائقة المغنطيسية لدرجة أنها تصدر دفقات هائلة من الطاقة المغنطيسية، وتغير الطبيعة الكمومية للخلاء.

(Ch. كوفليوتو).(C.R. دانكن).(Ch. طومسن)



يُطلق زلزال نجمي على مكنيتار قدراً كبيراً من الطاقة المغنطيسية يعادل طاقة زلزال أرضي بدرجة 21 وفق مقياس رختر، ويصدر كرة نارية من البلازما يحتجزها الحقل المغنطيسي وتسطع بأشعة كاما والأشعة السينية.

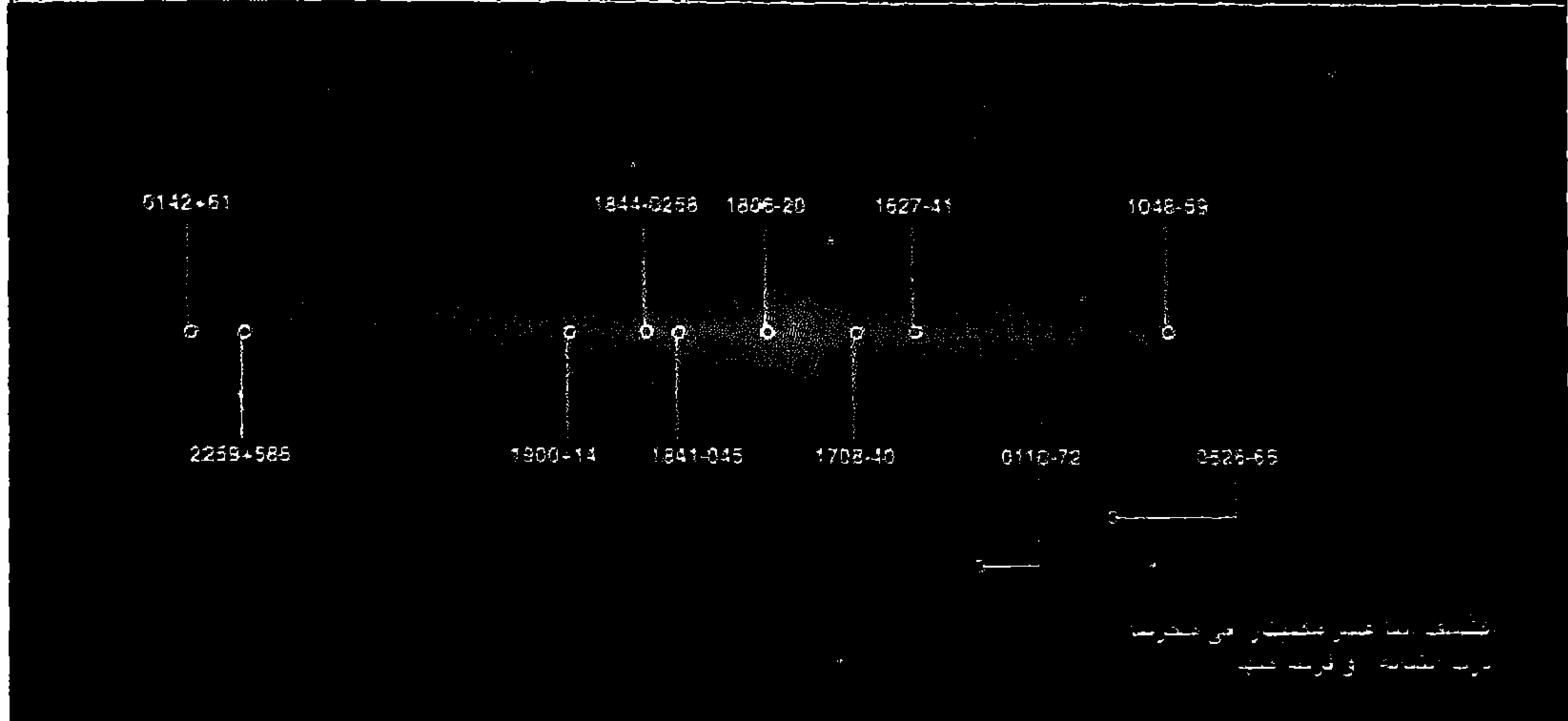
في 1979/3/5، وبعد عدة أشهر من إسقاط مسابير لاستكشاف كوكب الزهرة ذي الغلاف الجوي السام، كانت سفينتا الفضاء السوفييتيتان Venera 11 وVenera 12 تندفعان عبر المنظومة الشمسية الداخلية في مدار إهليلجي. لقد كانت رحلة غير زاخرة بالأحداث، فقراءات مقاييس الإشعاع على متن كل منهما كانت تتأرجح حول مئة عدّة في الثانية. لكن في الدقيقة الواحدة والخمسين بعد العاشرة صباحاً بتوقيت شرق الولايات المتحدة الأمريكية، داهمتها نبضة من أشعة كاما. وخلال جزء من الملي ثانية، قفز مستوى الإشعاع إلى أعلى من 200000 عدّة في الثانية، ثم تجاوز الحد الأقصى للمقياس.

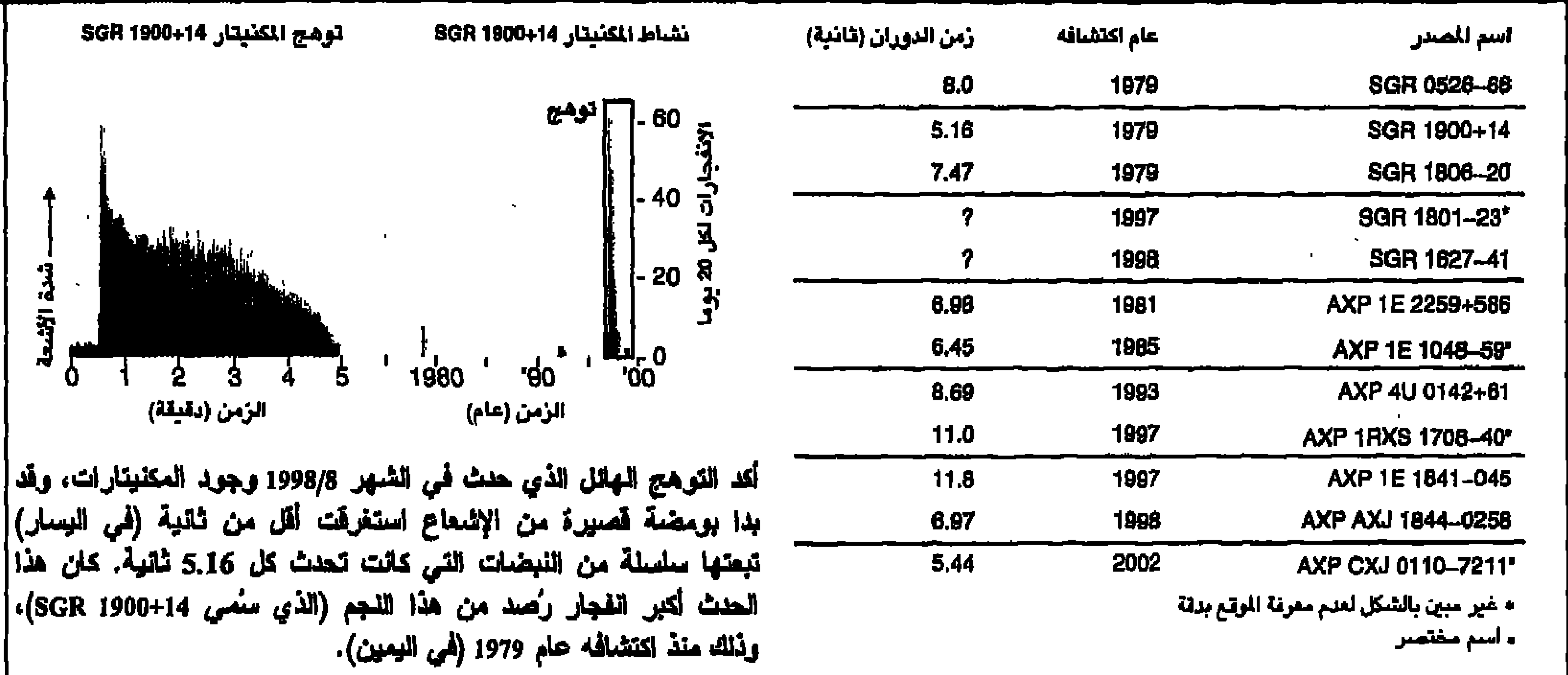
وبعد 11 ثانية غمرت أشعة گاما مسبار الفضاء Helios2، التابع للوكالة ناسا، والذي كان يدور أيضاً حول الشمس. كان من الواضح أن ثمة جبهة موجية مستوية من الأشعة ذات الطاقة العالية تجتاح المجموعة الشمسية، سرعان ما وصلت إلى كوكب الزهرة وتجاوزت طاقة قياس كاشف الإشعاع على متن مركبة الفضاء Pioneer Venus Orbiter. وخلال ثوان وصلت أشعة كاما إلى الأرض وغمرت كواشف الإشعاع المحمولة على متون ثلاثة من سواتل Vela التابعة لوزارة الدفاع الأمريكية، وعلى الساتل السوفييتي 7 Prognoz، ومرصد Einstein. وأخيراً، عندما كانت الموجة في طريقها للخروج من المنظومة الشمسية، داهمت مركبة الفضاء International Sun Earth Explorer.

> **نظرة إجمالية/نجوم فائقة المغنطيسية(*)**
>
> - وجد الفلكيون بضعة نجوم تُطلق ومضات متوهجة من أشعة گاما والأشعة السينية يفوق سطوعها ملايين المرات سطوع أي مصدر مكرر آخر لهذه الأشعة. تشير الطاقات الهائلة والإشارات النابضة المصاحبة لهذه الأشعة إلى أن مصدرها هو ثاني أكثر الأجرام الكونية غرابة (بعد الثقب الأسود)، ألا وهو النجم النتروني.
> - يملك هذا النوع من النجوم النترونية أقوى حقل مغنطيسي جرى قياسه على الإطلاق. ولذلك سميت مكنيتارات(1)، أي النجوم الفائقة المغنطيسية. تثير الطاقة المغنطيسية العالية اضطرابات على سطوح المكنيتار تشبه الزلازل الأرضية، ويمكنها تفسير ومضات (توقدات) الأشعة الساطعة.
> - تظل المكنيتارات ناشطة قرابة عشرة آلاف سنة فقط، وهذا يدل على أن الملايين منها تجوب مجرتنا من دون اكتشافنا لها بعد.
>
> (*) Overview/Ultramagnetic Stars.
>
> (1) الكلمة magnetar منحوتة من الكلمتين الإنكليزيتين magnetic star (النجوم المغنطيسية) وعربت منحوتة: مكنيتار.

(*) العنوان الأصلي: MAGNETARS

نجوم مرشحة لتكون مغنيتارات(*)





اسم المصدر	عام اكتشافه	زمن الدوران (ثانية)
SGR 0526-66	1979	8.0
SGR 1900+14	1979	5.16
SGR 1806-20	1979	7.47
SGR 1801-23*	1997	?
SGR 1627-41	1998	?
AXP 1E 2259+586	1981	6.98
AXP 1E 1048-59*	1985	6.45
AXP 4U 0142+61	1993	8.69
AXP 1RXS 1708-40*	1997	11.0
AXP 1E 1841-045	1997	11.8
AXP AXJ 1844-0258	1998	6.97
AXP CXJ 0110-7211*	2002	5.44

* غير مبين بالشكل لعدم معرفة الموقع بدقة
• اسم مختصر

أكد التوهج الهائل الذي حدث في الشهر 1998/8 وجود المكنيتارات، وقد بدأ بومضة قصيرة من الإشعاع استغرقت أقل من ثانية (في اليسار) تبعتها سلسلة من النبضات التي كانت تحدث كل 5.16 ثانية. كان هذا الحدث أكبر انفجار رُصد من هذا النجم (الذي سُمي SGR 1900+14)، وذلك منذ اكتشافه عام 1979 (في اليمين).

كانت هذه النبضة من أشعة گاما ذات الطاقة العالية القاسية hard أقوى مئة مرة من أي انبثاق سابق لأشعة گاما من خارج المنظومة الشمسية، على الرغم من استمرارها عُشْري ثانية فقط. في تلك الأثناء، لم يلحظ أحد شيئاً، واستمرت الحياة بوجه هادئ وطبيعي تحت الغلاف الجوي الواقي لكوكبنا. ولحسن الحظ، فقد نجت السفن الفضائية العشر من دون أن تحل بها أضرار دائمة. تبع هذه النبضة الشديدة وهج أقل سطوعاً لأشعة گاما الأقل طاقة وللأشعة السينية، التي خفتت تدريجيا خلال الدقائق الثلاث التالية. وخلال ذلك، صارت الأشعة تتذبذب برفق بدور قدره ثماني ثوان. وبعد 14 ساعة ونصف، أي في الساعة الواحدة وسبع عشرة دقيقة من يوم 3/6/ 1979 أتت بَقْة أخرى من البقعة نفسها في السماء، لكنها كانت أقل سطوعاً. وعلى مدار السنوات الأربع التالية تمكن (P.E. مازيتس) وزملاءه [من معهد Ioffe في سانت بيترسبيرغ بروسيا] من رصد 16 انبثاقاً لأشعة گاما من الاتجاه نفسه. تفاوتت تلك الانبثاقات في درجة سطوعها، لكنها كانت جميعاً أقل سطوعا وأقصر زمناً مما حدث في 1979/3/5.

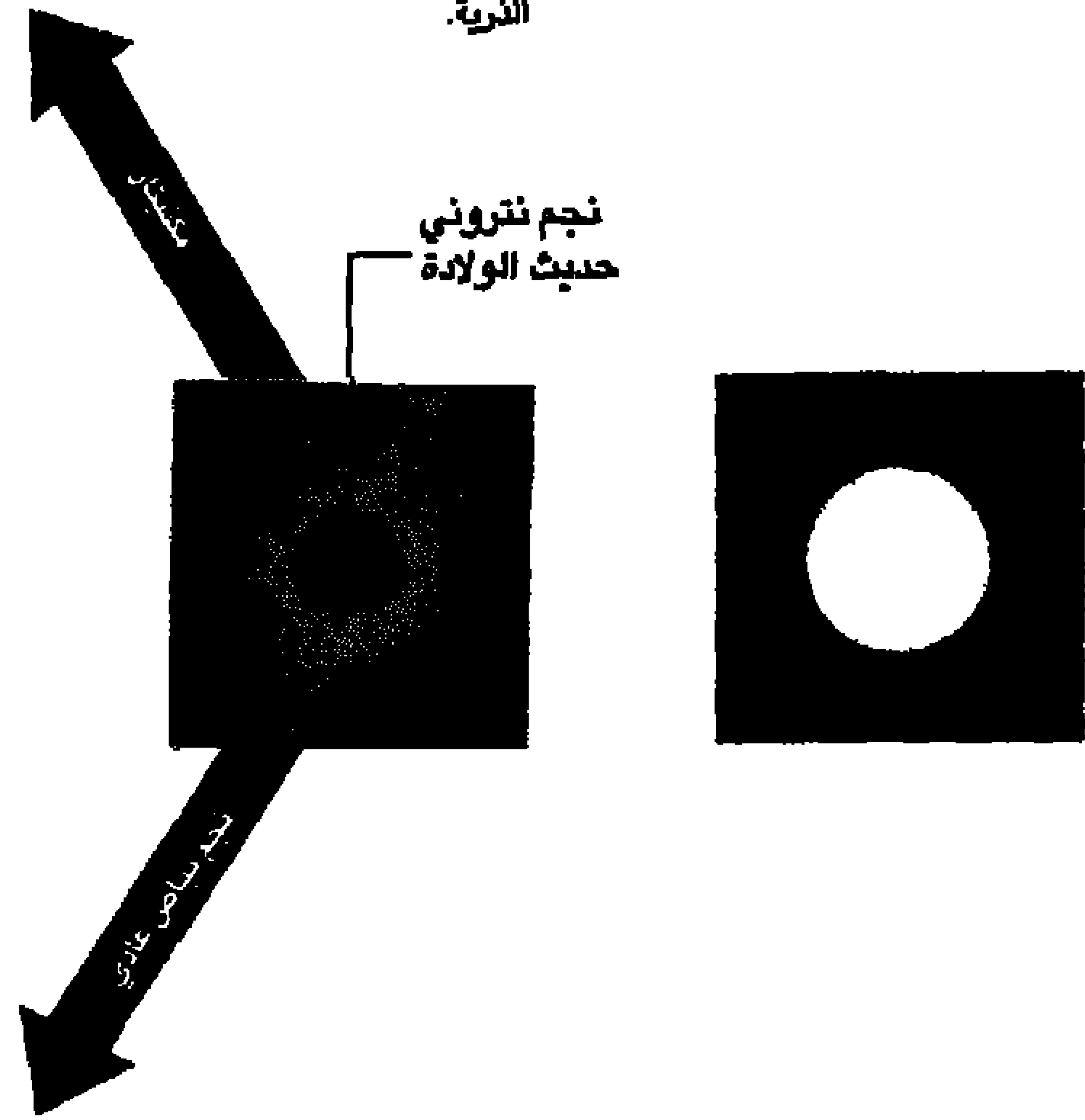
لم يرَ الفلكيون شيئاً كهذا من قبل. وبغية حصولهم على فكرة أفضل، فقد وضعوا مبدئيا هذه الانبثاقات ضمن تصنيفات نوع آخر من انبثاقات أشعة گاما Gamma-ray bursts (GRBS) التي كانت معروفة على وجه أفضل في ذلك الوقت، على الرغم من اختلافاتها الواضحة في عدة أوجه. وفي منتصف الثمانينات، أدرك (K.C. هارلي) [من جامعة كاليفورنيا ببركلي] أن ثمة انبثاقات مشابهة تأتي من موضعين آخرين في السماء. كان واضحا أن هذه المصادر تطلق تلك الانبثاقات بطريقة متكررة على عكس انبثاقات GRB التي لا تتكرر من الموضع نفسه مرة أخرى [انظر: *"أسطع الانفجارات في الكون"، العلوم، العددان 7/6 /2003، ص32*]. وفي مؤتمر للفلكيين في تولوز بفرنسا في الشهر 1986/7، جرى الاتفاق بين الفلكيين على المواقع التقريبية لهذه المصادر الثلاثة، وأطلقوا عليها اسم "مُكررات أشعة گاما اللينة" (SGRs) Soft gamma repeaters. وبهذا اكتسبت أبجديات علم الفلك عنصراً جديداً.

(*) Magnetar Candidates.

نوعان من النجوم النترونية(*)

1 يُظن أن معظم النجوم النترونية تبدأ كنجوم ضخمة، لكن عادية، بكتل تقع بين ثماني مرات وعشرين مرة من كتلة الشمس

2 تنتهي حياة هذه النجوم الضخمة بانفجار مستعر أعظمي من النوع الثاني type II، عندما يتحول قلب النجم إلى كرة كثيفة من الجسيمات الأولية/ دون الذرية.



3A إذا كان النجم النتروني المولود حديثا يُدوّم بسرعة عالية بقدر كاف، فإنه يولد حقلا مغنطيسيا كثيفا، تلتوي خطوطه داخل النجم.



4A يستقر المگنيتار في طبقات دقيقة، تلتوي في داخلها خطوط الحقل المغنطيسي وتكون منتظمة في الخارج. وقد يُصدر النجم حزمة ضيقة من الموجات الراديوية.



3B إذا كان النجم النتروني المولود حديثا يدوّم ببطء، فعلى الرغم من أن حقله المغنطيسي قوي بالمقاييس الاعتيادية، فإنه لا يبلغ مستوى المگنيتار.



4B يكون النجم النابض الناضج أبرد من المگنيتار الذي له العمر نفسه. يصدر هذا النجم حزمة راديوية عريضة يُمكن للمقاريب رصدها بسهولة.



مرت سبع سنوات أخرى قبل أن يبتكر اثنان من مؤلفي هذه المقالة (دانكن وطومسن) تفسيراً لهذه المصادر الغريبة. وفي عام 1998 وجدت المؤلفة المشاركة (كوڤليوتو) وفريقها دليلا قويا على هذا التفسير. وتربط المشاهدات الرصدية الحديثة نظريتنا بنوع آخر من الألغاز السماوية المعروفة بنابضات الأشعة السينية الشاذة (AXPs) anomalous X-ray pulsars وقد أدت هذه التطورات إلى طفرة في فهمنا لواحد من أكثر الأجسام السماوية غرابة ألا وهو النجم النتروني.

النجوم النترونية هي أكثر الأجسام المادية المعروفة كثافة، لأنها تحوي مادة كتلتها أكبر من كتلة الشمس بقليل في حيز قطره 20 كيلومتراً فقط وبناءً على دراسة المصادر SGRs يبدو أن لبعض النجوم النترونية حقلاً مغنطيسياً فائق الشدة لدرجة أنها تغير جذريا طبيعة المادة بداخلها والحالة الكمومية للخلاء المحيط بها، وهذا يؤدي إلى تأثيرات فيزيائية لا يمكن مشاهدتها في أي مكان آخر من الكون.

ليس من المفترض أن تفعل ذلك(**)

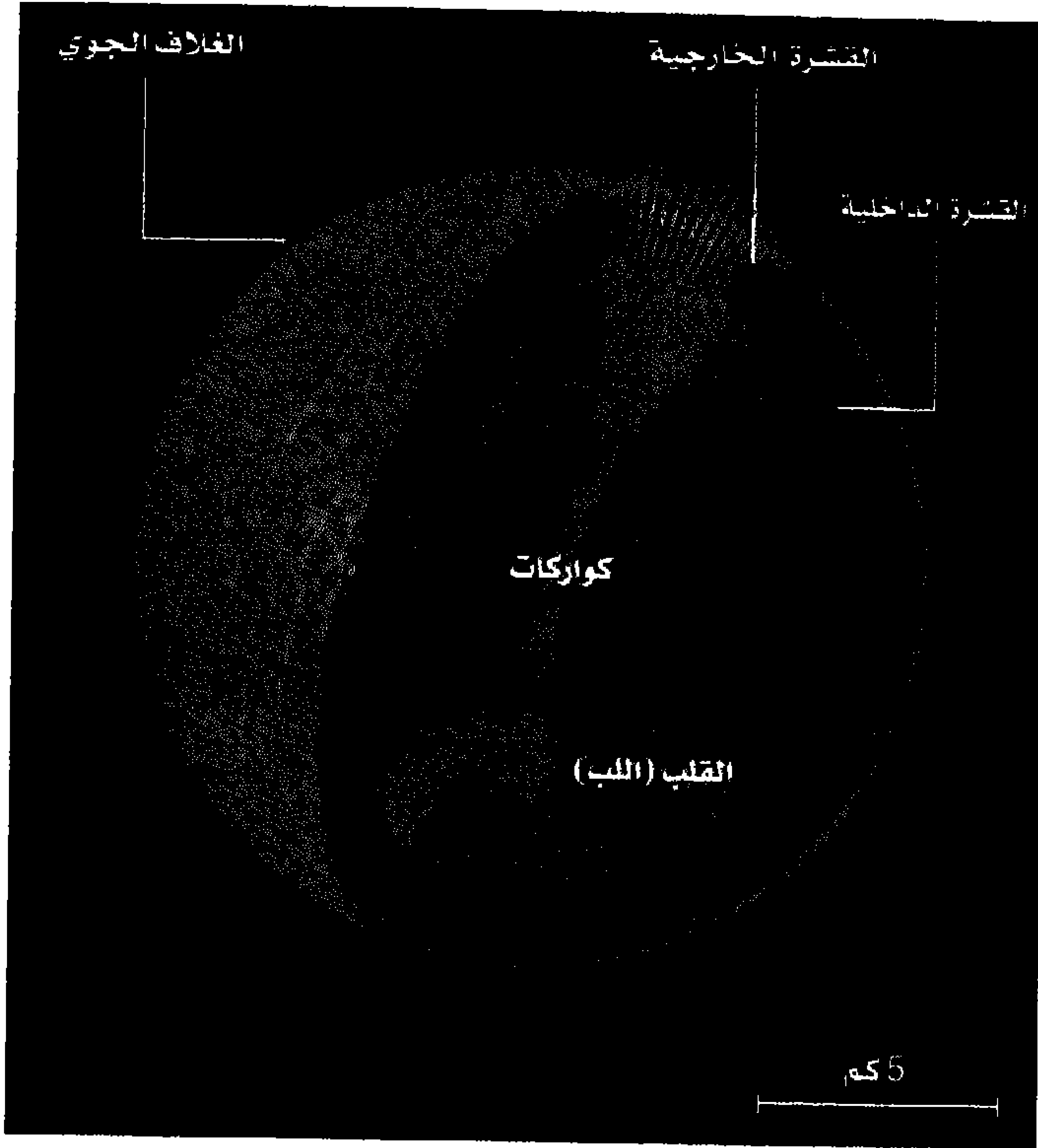
لأن انبثاق الشهر 1979/3 كان شديد السطوع اعتقد الفلكيون النظريون في ذلك الوقت أن مصدره يقع داخل مجرتنا وعلى بعد بضع مئات من السنين الضوئية على الأكثر من الأرض. ولو كان ذلك صحيحا، لكانت شدة الأشعة السينية وأشعة گاما أقل قليلا من الحد الأقصى النظري للسطوع المستقر الذي بإمكان نجم ما أن يصدره. وتحكم هذا الحد الأعلى، الذي استنتجه الفيزيائي الفلكي البريطاني (A. إدنگتون) في عام 1926 ، قوة تدفق الأشعة خلال الطبقات الخارجية الساخنة للنجم. إذا تجاوز سطوعُ الأشعة هذا الحد، فاقت قوتها قوة ثقالة النجم، وأبعدت المادة المتأينة، وأخلّت بتوازن النجم. وبطبيعة الحال، فإن الإشعاع الأدنى من حد إدنگتون واضح التفسير. وعلى سبيل المثال اقترح عدد من الفلكيين النظريين أن هذا الانفجار كان نتيجة تصادم كتلة مادية، كأن تكون كويكباً أو مذنباً، بنجم نتروني قريب.

لكن سرعان ما أربكت الأرصاد هذه الفرضية، فقد سجلت السفن الفضائية المختلفة زمن وصول نبضة 1979/3/5 القوية، وأتاحت هذه المعلومات للفلكيين بقيادة (L.T. كلاين) [من مركز گودارد للطيران الفضائي التابع للوكالة ناسا] تحديد مصدر الانبثاق، ووجد الباحثون أن ذلك الموضع يتطابق مع موضع السحابة الماجلانية الكبيرة، وهي مجرة صغيرة تبعد عنا قرابة 170 ألف سنة ضوئية، وبالتحديد فقد وافق الموضع مكان بقايا مستعر أعظمي فتيّ young supernova remnant ، وهو التوهج المتبقي من آثار نجم انفجر قبل خمسة آلاف سنة. وإذا لم يكن هذا الاقتران محض صدفة، فهو يضع المصدر أبعد ألف مرة عن ذاك الذي ظنه النظريون، الأمر الذي يتطلب أن يكون الانفجار أسطع من حد

(**) Not Supposed to Do That

(*) Two Types Of Neutron Stars.

نوعان من النجوم النترونية



5A يبرد المكنيتار المتقدم في العمر، وتسعى مغنطيسيته إلى الزوال. وهو يبث قدرا ضئيلا جدا من الطاقة.

العمر أكبر من 100 000 سنة

5B يبرد النجم النباض المتقدم في العمر، ويتوقف عن إصدار حزم من الموجات الراديوية.

يمكن استنتاج التركيب الداخلي لنجم نتروني من نظريات المادة النووية nuclear matter. تحدث الزلازل النجمية star quakes على القشرة الخارجية للنجم التي تتكون من نسيج شبكي من نوى ذرية وإلكترونات. يتكون لب (قلب) النجم أساساً من النترونات، وربما الكواركات quarks. وقد يتكون حوله غلاف جوي من البلازما الساخنة التي ترتفع فوق سطحه بضعة سنتيمترات.

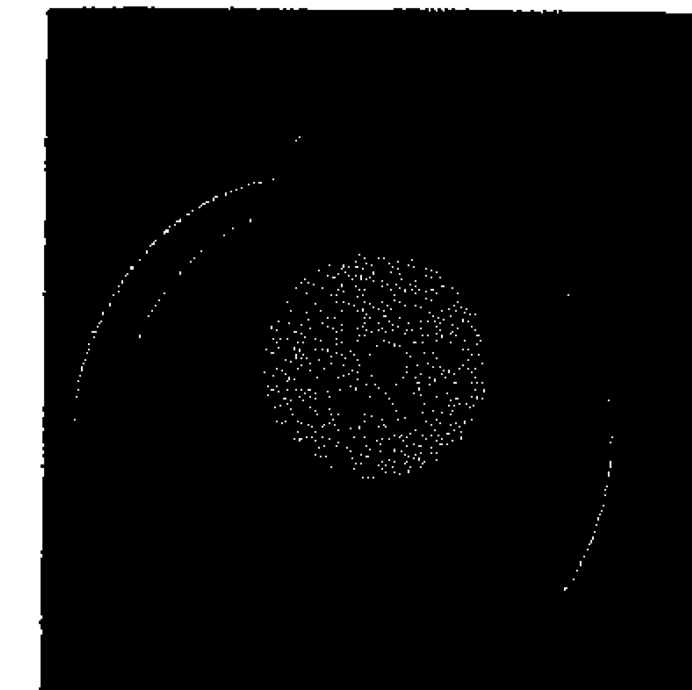
إدنكتون بمليون مرة. في غضون 0.2 من الثانية، أطلق حدث الشهر 1979/3 طاقة تعادل ما تطلقه الشمس في عشرة آلاف سنة، وركزها في أشعة كاما بدلاً من توزيعها عبر نطاق الطيف الكهرمغنطيسي.

ليس هناك نجم عادي يمكنه إصدار هذه الطاقة، ولهذا بات من المؤكد أن المصدر شيء فوق العادة، أي ثقب أسود أو نجم نتروني. وقد استُبعد الاحتمال الأول بسبب نبضان الأشعة بدور قدره 8 ثوان، فالثقب الأسود ليست له سمات مميزة، ويفتقر إلى المواصفات المطلوبة لإصدار نبضات منتظمة. ثم إن ربط مصدر الانفجار ببقايا المستعر الأعظمي أدى إلى تعزيز فكرة النجم النتروني. وثمة اعتقاد واسع بأن النجوم النترونية تتكون عندما يستنفد نجم ضخم الكتلة ـ لكن عادي ـ وقوده النووي من قلبه، ومن ثم ينهار بسرعة بسبب وزنه محدثا انفجار مستعر أعظمي.

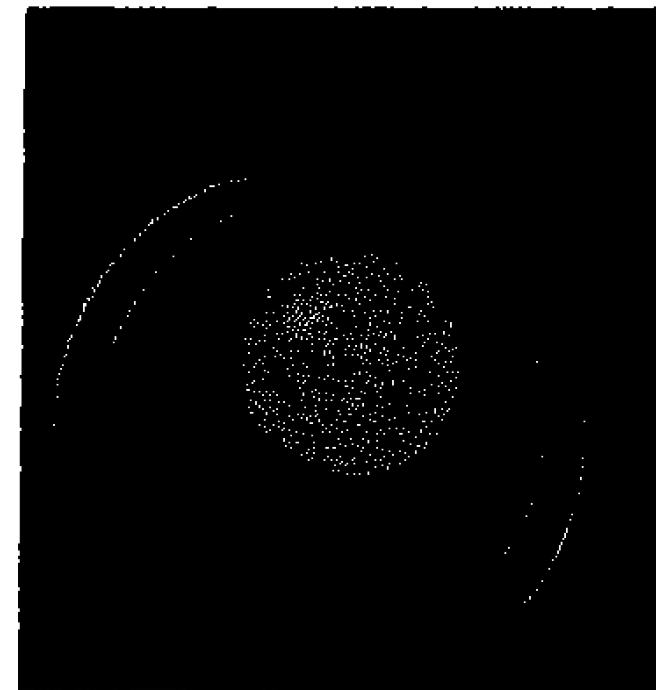
إن اعتبار المصدر نجماً نترونياً لم يحل اللغز، بل على العكس زاده غموضا، فقد عرف الفلكيون عدة أمثلة عن نجوم نترونية تقع داخل بقايا مستعرات أعظمية. هذه النجوم نباضات راديوية radio pulsars، وهي أجسام شوهدت تُطلق ومضات راديوية الموجة. لكن دوران مصدر انفجار الشهر 1979/3، الذي يستغرق ثماني ثوان ليدور مرة حول نفسه، أبطأ بكثير من أي نباض راديوي معروف. كذلك ففي الوقت الذي لم يكن فيه مصدر الانبثاق يرسل ومضات كاما، كان هذا المصدر يرسل ومضات من الأشعة السينية على نحو منتظم، وهذا يتطلب طاقة أكبر من تلك التي توفرها الحركة الدورانية لنجم نتروني. ومن المستغرب أن النجم كان مُزاحاً إزاحة شديدة عن مركز بقايا المستعر الأعظمي. فإذا وُلد النجم في المركز، وهذا شيء محتمل، فلا بد أن يرتد بسرعة تقدر بنحو ألف كيلومتر في الثانية لحظة ولادته، وهذه السرعة العالية كانت تعد غير اعتيادية لنجم نتروني.

كيف تحدث انفجارات المكنيتارات(*)

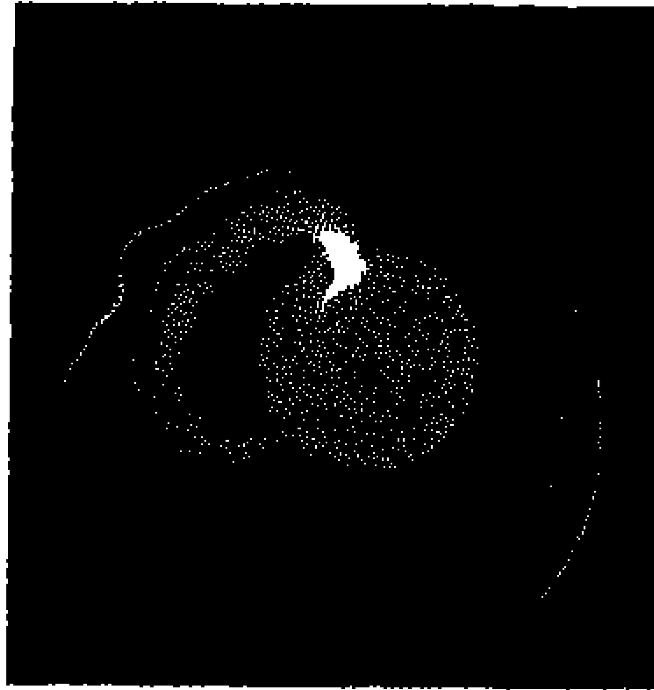
الحقل المغنطيسي لمكنيتار قوي إلى درجة تؤدي إلى تشقق قشرته وتفتيتها أحيانا، مطلقا قدرا كبيرا من الطاقة.



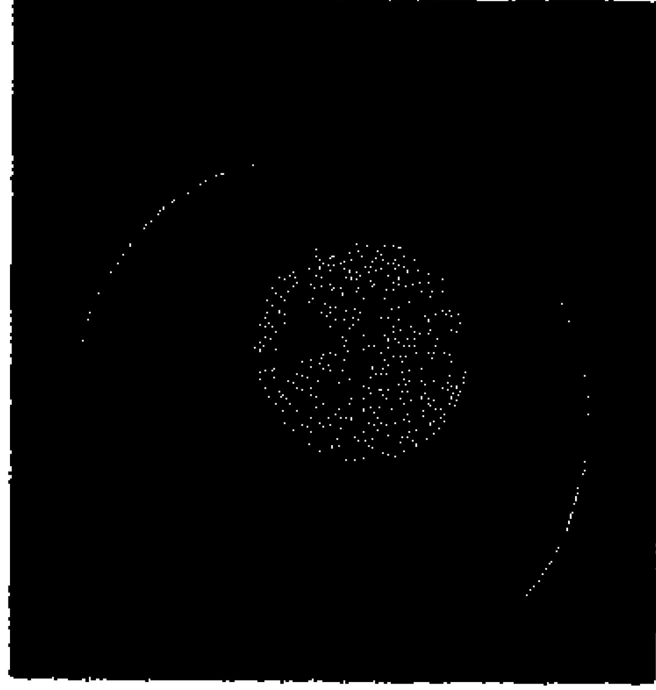
1 يكون المكنيتار هادئا معظم الوقت. لكن الإجهادات المغنطيسية تتراكم ببطء.



2 وفي مرحلة ما، تتجاوز الإجهادات التي تتعرض لها القشرة حدودها عند ذلك تتكسر القشرة، وربما تتحول إلى عدد كبير من القطع.



3 يولد هذا الزلزال النجمي تيارا كهربائيا قويا جدا، ثم يضمحل مخلفا وراءه كرة نارية حارة.



4 تبرد الكرة النارية بوساطة إطلاقها أشعة سينية من سطحها، ثم تتبخر في دقائق، أو أقل

وفي نهاية المطاف، فإن الانفجارات نفسها بدت متعذرة التفسير. فقد رُصدت سابقا ومضات أشعة سينية صادرة عن بعض النجوم النترونية، لكنها لم تتعد قط حد إدينكتون. ونسب الفلكيون هذه الومضات إلى اندماج نووي حراري للهيدروجين أو الهيليوم، أو إلى تنامٍ مفاجئ sudden accretion للمادة باتجاه النجم. لكن سطوع انبثاقات SGR كان غير مسبوق، ومن ثم فقد بدا أن ثمة آلية فيزيائية جديدة أصبحت مطلوبة.

التباطؤ الدوراني الأبدي(**)

رُصدت آخر بثقة من مصدر الشهر 1979/3 في الشهر 1983/5 ولم ترصد منه بثقات أخرى في التسعة عشر عاما التالية. وفي عام 1979 نشط أيضاً مصدران آخران من النمط SGR، ولا يزالان نشيطين، إذ أطلقا المئات من النفثات في الأعوام التالية. وقد اكتُشِف مصدر رابع من النمط SGR عام 1998. ثلاثة من هذه المصادر الأربعة ارتباطات محتملة مع بقايا مستعر أعظمي فتي، لكن هذه الارتباطات لم تثبت بعد. هناك اثنان منها يقعان أيضاً قرب حشود كثيفة لنجوم ضخمة فتية، وهذا يلمح إلى تكون المصادر SGR من هذا النوع من النجوم. وحديثا، نشط مصدر خامس مرشح ليكون من النمط SGR لم يُصدر بثقات كاما سوى مرتين فقط، لكن موقعه الدقيق لم يحدد بعد.

وفي عام 1996 توصل فريق من العلماء من المختبر الوطني بلوس ألاموس ــ هم (L.B. تشينك) و(I.R. إيستين)، و(A.R. كاير)، و(A.C. يانك) ــ إلى أن بثقات المصادر من النمط SGR تشبه إحصائيا الزلازل الأرضية. فالتوزعات الرياضياتية للطاقة شديدة التشابه، إذ تحدث الانبثاقات ذات الطاقة الأقل بقدر أوفر. وقد تثبّت تليمنا (E. كوكس) [الذي يُجري دراسات عليا في ألاباما بهانتسفل] من هذا السلوك لعينة كبيرة من الانبثاقات من مصادر مختلفة. هذه الخصائص الإحصائية هي سمة مميزة لأحداث حرجة ذات تنظيم ذاتي self – organized criticality، يصل فيها نظام مركب إلى أي حالة حرجة تجعل أي اضطراب طفيف يؤدي إلى تفاعل متسلسل. ويحدث هذا السلوك في أنظمة شتى مثل انهيارات التلال الرملية والتوهجات المغنطيسية magnetic flares على سطح الشمس.

لكن لماذا يتصرف نجم نتروني على هذا النحو؟ انبثق الحل من خط عمل مختلف تماما، ألا وهو النباضات الراديوية radio pulsars التي يُعتقد على نطاق واسع أنها نجوم نترونية ممغنطة سريعة الدوران. إن الحقل المغنطيسي لهذه النجوم (الذي تسانده تيارات كهربائية تنساب في أعماق النجم يدور مع النجم، وهذا يؤدي إلى انبعاث أحزمة من الموجات الراديوية من القطبين المغنطيسيين للنجم، وبدورانها مع النجم، تجتاح هذه الموجات الفضاء، تماما كضوء منارات السفن، ومن هنا تأتي النبضات المرصودة. يطلق النجم النباض أيضا دفقة من الجسيمات المشحونة والموجات الكهرمغنطيسية المنخفضة التردد التي تستقطع بدورها طاقةً وزخماً زاوياً angular momentum من النجم، وهذا يتسبب في انخفاض معدل دورانه تدريجياً.

لعل النجم النباض الأكثر شهرة هو الكامن في سديم السرطان carab nebula، وهو بقايا انفجار مستعر أعظمي شوهد عام 1054. يدور هذا النجم حول نفسه مرة كل 33 ملي ثانية، ويتباطأ دورانه بمعدل 1.3 ملي ثانية لكل قرن. وبإجراء استقرار تراجعي لتغير سرعة دورانه وفق هذا المعدل، يتبين أن النجم قد وُلِد وهو يدور حول نفسه مرة كل 20 ملي ثانية. ويتوقع الفلكيون أن يستمر النجم في التباطؤ إلى أن يبلغ معدل دوران بطيء جدا لا يكفي لإصدار نبضات راديوية. لقد قيس معدل تباطؤ التدويم spin – down rate لجميع النباضات الراديوية تقريبا، وتشير الدراسات النظرية إلى اعتماده على شدة الحقل المغنطيسي للنجم. ومن هذه العلاقة، نستنتج أن الحقل المغنطيسي

(*) How Magnetar Bursts Happen.

(**) spin Forever Down

لغالبية النباضات الراديوية الفتية يقع بين 10^{12} و10^{13} كاوس. وبغية المقارنة، فإن قوة مغنطيس الثلاجة قرابة 100 كاوس.

فرن الحمل الحراري الأعظم(**)

تترك هذه الصورة سؤالاً أساسياً من دون جواب وهو: من أين انطلق هذا الحقل المغنطيسي في البداية؟ لقد كان الافتراض المعهود لمعظم الفلكيين أن الحقل المغنطيسي هو أثر النجم قبل تحوله إلى مستعر أعظمي. إن لجميع النجوم في حالتها العادية حقولا مغنطيسية ضعيفة، ومن الممكن أن تقوى هذه المجالات بفعل الانضغاط. ووفقا لمعادلات ماكسويل في الكهرمغنطيسية، فعند تقلّص جسم ممغنط إلى نصف حجمه الأصلي، فإن شدة حقله المغنطيسي تتضاعف أربع مرات. ولما كان حجم اللب core الداخلي لنجم ضخم يصغُر عند تحوله إلى نجم نتروني 10^5 مرة فإن شدة حقله المغنطيسي تكبر 10^{10} مرة.

وإذا كان الحقل المغنطيسي للب النجم قويا بدرجة كافية في البداية، فإن هذا الانضغاط يمكن أن يفسر مغنطيسية النجم النباض. لكن، لسوء الحظ، لا يمكن قياس الحقل المغنطيسي في أعماق النجم، لذا يصعب اختبار هذه الفرضية البسيطة. هناك أيضا أسباب وجيهة تدعو للاعتقاد بأن الانضغاط ليس سوى جزء من القصة.

يمكن للغازات أن تتحرك دائرياً داخل النجم بفعل الحمل الحراري convection، فترتفع الأجزاء الساخنة من الغازات المتأينة في حين تهبط أجزاؤها الباردة. ولأن الغازات المتأينة موصلة جيدة للكهرباء، فأي خطوط للحقل المغنطيسي تتخلل الغازات، تنساق معها أثناء الحركة. لذا يمكن للحقل أن يتطور ويقوى أحياناً. تُعرف هذه الظاهرة باسم «فعل الدينامو» Dynamo Action، ويُعتقد أنها المسؤولة عن توليد الحقول المغنطيسية للنجوم والكواكب. قد يكون فعل الدينامو مؤثراً في كل مرحلة من حياة النجم تدور خلالها أجزاؤه الداخلية المضطربة بسرعة كافية. إضافة إلى ذلك، يشتد الحمل الحراري بوجه خاص خلال مدة قصيرة تعقب تحول لب النجم إلى نجم نتروني.

أُظهر ذلك أول مرة عام 1986 في محاكيات حاسوبية أجراها (A. باروز) [من جامعة أريزونا] و(M.J. لاتيمير) [من جامعة نيويورك في ستوني بروك] إذ وجدا أن درجات الحرارة داخل نجم نتروني حديث الولادة تتجاوز 30 بليون درجة كلفن، وأن المائع النووي الساخن يدور داخل النجم مرة كل 10 ملّي ثانية، أو أقل، حاملاً كمية هائلة من الطاقة الحركية. وبعد نحو 10 ثوان يتوقف الحمل الحراري.

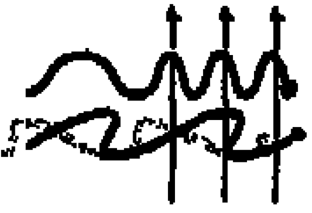
وبعد مدة ليست بالطويلة من إجراء (باروز) و(لاتيمير) محاكاتهما الأولى، قام (دانكن) و(طومسون) [اللذان كانا بجامعة برنستون في ذلك الوقت] بتقدير ما يعنيه ذلك الحمل الحراري الهائج لمغنطيسية النجم النتروني. ويمكن للشمس، التي تمر بمرحلة هادئة من العملية نفسها، أن تكون مرجعاً. فأثناء دوران المائع النووي داخل الشمس، يسحب معه خطوط الحقل المغنطيسي، ويتخلى له عن زهاء 10 في المئة من طاقته الحركية. وبالمثل، فلو أن المائع المتحرك داخل نجم نتروني يتخلى عن عُشر طاقته الحركية إلى الحقل المغنطيسي، لازدادت شدة الحقل لتتجاوز 10^{15} كاوس، وهي أقوى بأكثر من ألف مرة من شدة حقول معظم النباضات الراديوية.

يعتمد أداء فعل الدينامو داخل النجم كله (لاداخل مناطق محدودة منه) على كون معدل دوران النجم قريباً من معدل دوران تيارات الحمل الحراري. ويكون هذان المعدلان متماثلين داخل أعماق الشمس، حيث يستطيع الحقل المغنطيسي أن ينظم نفسه على نطاقات واسعة. وقياساً على ذلك، فإذا وُلِد نجم نتروني بمعدل دوران أسرع أو مساو لدور تيارات الحمل الحراري (10 ملي ثانية)، فباستطاعته إحداث حقل مغنطيسي فائق القوة وواسع الانتشار. وفي عام 1992، أسمينا هذه النجوم النترونية الافتراضية مكنيتارات magnetars.

يُقدر الحد الأعلى لمغنطيسية نجم نتروني بنحو 10^{17} كاوس؛ وإذا جرى تجاوز هذا الحد، فإن المائع النووي داخل النجم يختلط، ومن ثم يتبدد الحقل. ليست هناك أجسام معروفة في الكون بإمكانها توليد حقول تتجاوز هذا المستوى، ثم الحفاظ عليها. أحد تفرعات نظريتنا هو أن النباضات الراديوية نجوم نترونية فشل فيها تأثير الدينمو الواسع النطاق في العمل. في حال نباض السرطان، يدور النجم النتروني الحديث الولادة مرة كل 20 ملي ثانية، وهذا أبطأ بكثير من معدل دوران الحمل الحراري، لذلك فإن الدينمو لم يعمل قط.

مغنطيسية متطرفة(*)

للحقول المغنطيسية تأثير مربك في الإشعاع والمادة



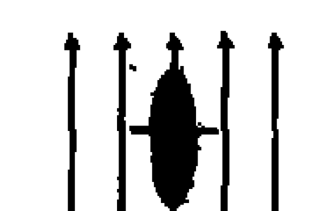
الانكسار الثنائي للخلاء
تغير الموجات الضوئية المستقطبة (اللون البرتقالي) سرعتها، ومن ثم أطوالها الموجية، وذلك عند دخولها حقلاً مغنطيسيا قويا جداً.



انقسام الفوتونات
الأثر الناجم عن ذلك هو أن الأشعة السينية إما أن تنقسم إلى قسمين، وإما أن تندمج معاً. وهذه العملية مهمة في الحقول التي هي أقوى من 10^{14} كاوس.



إخماد التبعثر
يمكن لموجة ضوئية أن تتسلل عبر إلكترون (الدائرة السوداء)، مواجهة إعاقة طفيفة إذا منع الحقل الإلكترون من الاهتزاز مع الموجة



تشويه الذرات
إن الحقول التي هي أقوى من 10^9 كاوس تضغط مدارات الإلكترونات لتتخذ أشكال سيكار Cigar. وفي حقل قوته 10^{14} كاوس، تضيق ذرة الهيدروجين في وسطها 200 مرة.

(**) العنوان الأصلي: he Ultimate Convection Oven

(*) Extreme Magnetism.

تلألأ وتجعّد أيها المكنيتار الصغير(*)

مع أننا لم نبتكر فكرة المكنيتار لشرح مصادر SGRs فإن تضميناتها سرعان ما أصبحت واضحة لنا. يعمل الحقل المغنطيسي ككابح قوي لدوران المكنيتار، ففي غضون خمسة آلاف سنة، سوف يبطئ مجال مغنطيسي شدته 10^{15} كاوس من معدل دوران النجم السريع إلى دورة واحدة كل ثماني ثوان، وهذا يفسر بدقة النبذبات التي رُصدت خلال انفجار الشهر 1979/3.

وبتطور الحقل، تتغير هيئته دافعاً تيارات كهربائية على طول خطوط الحقل خارج النجم. وهذه التيارات بدورها، تولد أشعة سينية. وفي غضون ذلك، ومع تحرك الحقل المغنطيسي عبر القشرة الصلبة للمكنيتار، فإنه يحدث انحناءات واستطالات في قشرة النجم. تسفر هذه العملية عن تسخين الجزء الداخلي للنجم، ومن حين إلى آخر، تتشق القشرة محدثة زلزالا نجمياً قوياً. تُحدث الطاقة المغنطيسية المحررة المصاحبة لهذا الزلزال سحابة كثيفة من الإلكترونات والبوزترونات، إضافة إلى انفجار مفاجئ لأشعة كاما اللينة soft gamma rays، وهذا يفسر الانبثاقات الأقل حدة التي تعطي SGRs اسمها.

وفي حالات نادرة، يصبح الحقل المغنطيسي غير مستقر، ومن ثم يخضع لإعادة تنظيم على نطاق واسع. وأحيانا تحدث انتفاخات مماثلة في الشمس، ولكن بدرجة أقل مسببة توهجات (توقدات) شمسية solar flares. ولدى المكنيتار طاقة كافية تمكنه بسهولة من إنتاج توهج هائل مثل الذي حدث في الشهر 1979/3. وتبين النظرية أن نصف الثانية الأول من زمن هذا الانفجار الضخم جاء من كرة نارية متمددة. وفي عام 1995 اقترحنا أن جزءاً من الكرة النارية احتُجز بوساطة الحقل المغنطيسي قريباً من سطح النجم. وتدريجيا انكمشت هذه الكرة وتبخرت مطلقة أشعة سينية طوال الوقت. واستناداً إلى كمية الطاقة المحررة فقد قدرنا قوة الحقل المغنطيسي الضرورية لاحتواء الضغط الهائل للكرة النارية بأعلى من 10^{14} كاوس. وتتفق هذه النتيجة مع قوة الحقل المستنتجة من معدل تباطؤ التدويم spin – down rate.

وفي عام 1992 قدم (B. باشينسكي) [من جامعة برنستون] تقديرا مستقلا عندما لاحظ أن الأشعة السينية تنساب بسهولة أكبر خلال سحابة من الإلكترونات عندما تكون الجسيمات المشحونة مطمورة في حقل مغنطيسي شديد القوة. فلكي تكون الأشعة السينية شديدة السطوع خلال الانفجار، لا بد للحقل المغنطيسي أن يكون أقوى من 10^{14} كاوس.

وما يجعل النظرية أكثر غموضا هو أن هذه الحقول أقوى من الحد الأعلى لشدة الحقل في النظرية الكهرديناميكية الكمومية quantum electrodynamics وهو $10^{13}\times 4$ كاوس. وفي حقول قوية كهذه، تحدث ظواهر غريبة. فقد تتقسم فوتونات الأشعة السينية إلى قسمين أو قد تندمج معا. ويصبح الخلاء نفسه مستقطبا وثنائي الانكسار تجاه الضوء مثل بلورات الكالسيت. هذا وتتشوه الذرات لتتخذ أشكالاً أسطوانية طويلة أكثر دقة من الطول الموجي الكمومي النسبي quantum – relativistic wavelength للإلكترون *[انظر الشكل في الصفحة 990]*. ولجميع هذه الظواهر الغريبة تأثيرات يمكن مشاهدتها في المكنيتارات. ولأن هذه الفيزياء غريبة جداً فقد جذبت النظرية عدداً صغيراً من الباحثين في ذلك الوقت.

انطلق مرة أخرى(**)

حينما كانت هذه التطورات النظرية تظهر للعيان ببطء، ظل الفلكيون يناضلون لرؤية الأجسام التي هي مصادر هذه الانبثاقات. وقد سنحت الفرصة الأولى عندما سجّل مرصد Compton Gamma Ray observatory التابع للوكالة ناسا بَثَّةً في الشهر 1993/10. كانت هذه هي الفرصة التي تنتظرها (كوفليوتو) عندما انضمت إلى فريق مصدر Compton في مدينة هانتسفل. استطاع المرصد تحديد مكان الانفجار، لكن في حيز واسع من السماء. طلبت (كوفليوتو) المساعدة من الساتل الصنعي الياباني ASCA، ووجد (T. مراكامي) مع معاونيه [من معهد علوم الفضاء والملاحة الفضائية الياباني] أن هناك مصدرا للأشعة السينية في الحيز نفسه. ظل المصدر يبث المستوى نفسه من الإشعاع، إلى أن أطلق انبثاقا آخر مثبتا بما لا يدعو للشك أنه من النوع SGR. وقد شوهد المصدر نفسه أول مرة في عام 1979، وبناء على إحداثياته السماوية التقريبية، أطلق عليه اسم SGR 1806-20. والآن، جرى تعيين موقع النجم بدقة أعلى، وهذا يمكّن من مراقبة أنشطته عبر الطيف الكهرمغنطيسي.

جاءت الطفرة التالية عام 1995 عندما أطلقت الوكالة ناسا المستكشف Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)، وهو ساتل صمم ليكون بالغ الدقة والحساسية لقياس التغيرات في الأشعة السينية. وباستخدام هذا المرصد، وجدت (كافليوتو) أن البث من SGR 1806-20 يتذبذب بزمن دوري قدره 7.47 ثانية، وهذا يجعله قريباً على وجه مدهش من التذبذب ذي الثماني ثوانٍ، الذي رُصِد في انبثاق الشهر 1979/3 (من SGR 0526-66). وفي غضون خمس سنوات تباطأ دوران (تدويم) هذا المصدر (SGR) اثنين في الألف. ومع أن مقدار هذا التباطؤ قد يبدو صغيراً، فهو أسرع من أي نباض راديوي معروف، ويستلزم حقلاً مغنطيسياً يقارب 10^{15} كاوس.

تتطلب الاختبارات الأكثر دقة لنموذج المكنيتار توهجا ضخما آخر. ولحسن الحظ، استجابت السماء بسرعة. ففي الصباح الباكر من 1998/8/27 بعد 19 عاما من التوهج الضخم الذي كان وراء بداية معرفة علم الفلك للمصادر SGR، وصلت الأرض موجة أشد من أشعة كاما والأشعة السينية قادمة من أعماق الفضاء. ودفعت هذه الأشعة كاشفات الإشعاع على متن سبع سفن فضائية علمية إلى أعلى معدلات القياس، أو تجاوزت الحدود القصوى للمقياس. وفي إجراء وقائي أُجبر أحد مسابير ناسا وهو Comet Rendezvous Asteroid Flyby على التوقف عن العمل. لقد ضربت أشعة كاما

(*) Crinkle Twinkle Little Magnetar

(**) Zapped Again

الجانب المظلم للأرض حيث كان سمتُ zenith مصدرها فوق منتصف المحيط الهادئ.

ومصادفة، كان المهندس (عمران عنان) وزملاؤه [من جامعة ستانفورد] يجمعون بيانات عن انتشار موجات راديوية ذات تردد منخفض جداً حول الأرض. وفي الساعة الثالثة والدقيقة 22 صباحاً بتوقيت غرب الولايات المتحدة لاحظوا تغيراً مفاجئاً في الطبقة العليا المتأنية للغلاف الجوي. فقد هبطت الحافة الداخلية لطبقة الأيونوسفير ionosphere من ارتفاع 85 كيلومتراً إلى 60 كيلومتراً وظلت هكذا مدة خمس دقائق. كان ذلك مدهشاً حقاً، فقد سبَّب هذا التأثير في كوكبنا نجمٌ نتروني من المجرة على بعد عشرين ألف سنة ضوئية!

أعجوبة أخرى للمكنيتار(*)

كان انفجار 1998/8/27 نسخة طبق الأصل من توهج الشهر 1979/13. وبصفة أساسية، فقد كانت قوته عُشر قوة بَثَّة الشهر 1979/3، لكن لما كان مصدر التوهج أقرب إلى الأرض، فقد كان أشد توهج مرصود لأشعة كاما من بين الانفجارات التي أتتنا من خارج المنظومة الشمسية. وقد أظهرت بضع المئات الأخيرة من الثواني من التوهج ذبذبات واضحة دورها 5.16 ثانية. لقد قامت (كوفليوتو) وفريقها بقياس معدل تباطؤ تدويم النجم باستخدام المرصد RXTE، ومن المؤكد أن النجم SGR 1900+14، مشيرا إلى حقل مغنطيسي قوي ذي شدة مماثلة. وبذلك دخل نجم جديد من النوع SGR دائرة الشهرة.

لقد سمح التحديد الدقيق لمواقع SGR في الأشعة السينية بدراستها باستخدام المقاريب الراديوية ومقاريب الأشعة تحت الحمراء. وقد استحدث هذه التقنية العديد من الفلكيين لاسيما (D. فريل) [من المرصد الوطني للفلك الراديوي] و(S. كولكرني) [من معهد كاليفورنيا للتقانة]. وأظهرت أرصاد أخرى أن جميع مصادر SGR الأربعة مستمرة في إطلاق طاقة ضعيفة (الأشعة السينية) تتخلل انفجارات كاما. وكلمة «ضعيفة» هنا نسبية، لأن هذه الأشعة السينية أقوى مما تصدره الشمس منها في الضوء المرئي بين 10 و100 مرة.

يمكن الآن القول إن الحقول المغنطيسية للمكنيتارات تقاس بطريقة أفضل من قياس الحقول المغنطيسية للنباضات. ففي النباضات المنعزلة يأتي الدليل الوحيد على وجود حقول شدتها 10^{12} كاوس من معدل تباطؤ التدويم. وبالمقابل، فإن اتحاد معدل تباطؤ التدويم العالي والتوهجات الساطعة للأشعة السينية يُعطي حججاً مستقلة على وجود حقول بقوة 10^{15} كاوس في المكنيتارات. وخلال إرسال هذا المخطوط إلى المطبعة قدم (علاء ابراهيم) ومعاونوه [من مركز كودارد للطيران الفضائي التابع للوكالة ناسا] مجموعة أخرى من الأدلة على وجود حقل مغنطيسي قوي في المكنيتارات متمثل بخطوط طيفية للأشعة السينية تبدو منبعثة من پروتونات تدور في مجال قدره 10^{15} كاوس.

وهناك تساؤل مثير للاهتمام، وهو يدور حول ما إذا كانت المكنيتارات مرتبطة بظواهر كونية أخرى إضافة إلى مصادر SGRs. وعلى سبيل المثال، هناك فئة من انبثاقات أشعة كاما القصيرة الأمد من نوع GRB التي لم تفسر بعد بطريقة مقنعة، ويمكن على الأقل لعدد قليل منها أن تكون توهجات مكنيتارات في مجرة أخرى. فحتى إذا شوهد توهج هائل من مسافات بعيدة، فسوف يكون قريباً من حدود حساسية المقاريب، وسوف تُسجَّل فقط الومضة الساطعة القصيرة الأمد من أشعة كاما الشديدة، وتصنف على أنها انبثاقات من النوع GRB.

وفي منتصف التسعينات، اقترح (طومسن) و(دانكن) أن بإمكان نموذج المكنيتار أن يفسر أيضاً نبّاضات الأشعة السينية الشاذة (AXPs)، وهي نوع من النجوم التي تشبه نجوم SGRs في أوجه عدة. كانت الصعوبة الوحيدة التي واجهت هذه الفكرة أننا لم نشاهد انفجارات من هذه المصادر. لكن (M.V. كاسپي) و(P.F. كاڤريل) [من جامعة ماككيل] و(M.P. وودز) [من المركز الوطني للفضاء والتقانة بمدينة هانتسفل] تمكنوا حديثاً من رصد انبثاقات من مصدرين من النباضات السبعة AXPs المعروفة. أحد هذه النجوم مقترن ببقايا مستعر أعظمي حديث في كوكبة ذات الكرسي Cassiopeia.

> **اكتشافات جديدة**
>
> شهد عام 2004 حدثين مهمين لنجوم المكنيتار اشتملا على اكتشاف نوع جديد من هذه النجوم ورصد توهج هائل من نوع Giant Flare.
>
> - في 2004/12/27 أطلق المكنيتار SGR 1806-20 توهجا هائلا من نوع Giant Flare هو الثالث من هذه النوعية بعد انفجاري 1979/3/5 و1998/8/27. كان ذلك الانفجار الأكبر من حيث الطاقة وشدة اللمعان وقد صُنف بأنه أقوى انفجار كوني على الإطلاق [انظر: " In Focus "Scientific American،June 2005]، وقد قام مرصد SWIFT الحديث التابع لوكالة ناسا برصد الانفجار وأكد الباحثون في المختبر الوطني بلوس الاموس أن طاقة الانفجار تجاوزت طاقة نظيريه السابقين بأكثر من 100 ضعف، الأمر الذي جعله أشد إضاءة من القمر!
> - في أوائل عام 2004 تم الإعلان عن اكتشاف نوع جديد من المكنيتارات أطلق عليها المكنيتارات المموهة transient magnetars. يظل هذا النوع من النجوم النترونية خامداً لفترات طويلة تقدر بعشرات السنين، مما يجعلها دون مستوى الرصد، ثم تنشط فجأة لفترات وجيزة. يدل هذا الاكتشاف الذي قام به (علاء ابراهيم) ورفاقه من مركز ناسا كودارد لطيران الفضاء على تضاعف أعداد نجوم المكنيتارات في مجرتنا وعلى إمكانية تتبع دورة حياتها في أطوارها المختلفة [انظر:
>
> http://imagine.gsfc.nasa.gov\docs\features\news\28jan2004.htm
> http://www.nesa.gov\centers\goddard\news\topstory\2004\0106
> [magnetar.htmal
>
> (التحرير)

(*) Another Magneto Marvel

هناك نباض AXP آخر في الكوكبة نفسها هو أول مرشح ليكون مكنيتاراً رصد نشاط له في الضوء المرئي. لقد لاحظ ذلك قبل ثلاث سنوات (F. هولمان) و(M. فان كيركويك) [من جامعة أوترخت بهولندا] بالتعاون مع (Sh. كولكرني). ومنذ ذلك الحين، يقوم (B. كيرن) و(C. مارتن) [من معهد كاليفورنيا للتقانة] برصد سطوع هذا النجم في الضوء المرئي. وعلى الرغم من خفوت ضوئه إلى حد بعيد، فإنه ينبض في الضوء المرئي بنفس دور الأشعة السينية المنبعثة من هذا النجم النتروني. تدعم هذه الأرصاد فكرة أن هذا النجم هو حقاً مكنيتار. ويتنبأ البديل الرئيسي لنموذج المكنيتار ــ أي إن النباضات AXPs نجوم نترونية عادية محاطة بأقراص من المادة ــ بكمية مفرطة من الإشعاعات المرئية وتحت الحمراء ذات نبضات ضعيفة جداً.

وعلى ضوء هذه الاكتشافات الحديثة والهدوء الظاهري للمكنيتار الكامن في السحابة الماجلانية الكبيرة طوال عشرين عاماً تقريباً، يبدو أن المكنيتارات قادرة على أن تغير رداءها لتبقى ساكنة سنين أو عقوداً قبل أن تمر بفترات مفاجئة من النشاط المفرط. ويحاجُّ بعض الفلكيين في أن النباضات من النوع AXPs أصغر عمرا في المتوسط من النجوم SGRs، لكن هذا الأمر لايزال محل جدل. فإذا كان كلاهما من نوع المكنيتار، فمن المقبول أن تكون هذه النجوم جزءاً جوهرياً من مجموع النجوم النترونية في الكون.

تُعتبر قصة المكنيتار تذكرة واقعية لنا بأن الإنسان ما زال يجهل الكثير عن الكون. فحتى الآن، لم نكتشف سوى قلة من المكنيتارات من بين عدد لانهائي من النجوم. تُعلن هذه النجوم عن نفسها خلال جزء من الثانية، وفي ضوء لا تستطيع رصده إلا أشد المقاريب تطوراً وتعقيداً. وخلال عشرة آلاف عام، ستفنى الحقول المغنطيسية للمكنيتارات وتتوقف عن إصدار الأشعة السينية الساطعة. لذا فهذه الدستة المعروفة من المكنيتارات تُفشي سر وجود أكثر من مليون، وربما مئة مليون مكنيتار قديم، انطفأ توهجها قبل زمن طويل. وتجوب هذه العوالم الغريبة من المكنيتارات الخامدة المعتمة الفضاء البينجمي. تُرى، كم من الظواهر الكونية الأخرى الشديدة الندرة والسريعة الزوال، التي لم نعرفها بعد، تتوارى عنا في ذلك الفضاء؟

المؤلفون

Chryssa Kouveliotou – Robert C. Duncoan – Christopher Thompson

يتعاونون في دراسة المكنيتارات منذ خمس سنوات، وخبرتهم الإجمالية في هذا المجال نحو 40 عاما. تعمل الراصدة (كوفليوتو) في المركز القومي لعلوم الفضاء والتقانة بهانتسفل في ولاية ألاباما. وإضافة إلى دراستها لنجوم SGR فهي تهتم أيضا بدراسة انبثاقات أشعة كاما Gamma Ray Bursts وثنائيات الأشعة السينية Binaries x - ray، وتشمل هواياتها علوم الآثار واللغويات. يعمل (دانكن) في جامعة تكساس بأوستن، أما (طومسون) فيعمل في المعهد الكندي للفيزياء الفلكية النظرية بتورنتو. درس (دانكن) المستعرات الأعظمية والحالة المادية للكواركات quark matter والسحب الغازية بين المجرات. وتتنوع أبحاث (طومسون) من دراسة الأوتار الكونية cosmic strings إلى الارتطامات الكبيرة في المراحل المبكرة للمنظومة الشمسية.

مراجع للاستزادة

Formation of very Strongly Magnetized Neutron Stars: Implications for Gamma-Ray Bursts. Robert C. Duncan and Christopher Thompson in Astronomical Journal، Vol. 392، No. 1،pages L9-L13; June 10،1992. Available at makeashorterlink.com\?B16A425A2

An X-ray pulsar with a Superstrong Magnetic Field in the Soft Gamma-Ray Repeater SGR1806-20. C. Kouveliotou، S. Dieters، T. Strohmayer، J. Von Paradijs، G. J. Fishman، C. A. Meegan، K. Hurley، J. Kommers، I. Smith، D. Frail and T. Murakami in Nature، Vol 393 pages 235-237; May 21،1998.

The Life of a Neutron Star. Joshua N. Winn in Sky & Telescope، Vol. 98، No. 1، Pages 30-38; July 1999.

Physics in Ultra-strong Magnetic Fields. Robert C. Duncan. Fifth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium، February 23،2002.

Available at arXiv. org\abs\astro-ph\0002442

Flash! The Hunt for the biggest Explosions in the Universe.

Govert Schilling. Cambridge University Press، 2002.

More information can be found at Robert C. Duncan's Web site: Solomon.as.utexas.edu\magnetar.html



استخدام أذكى للنفايات النووية (*)

تستطيع مفاعلات النيوترونات السريعة استخلاص المزيد من طاقة الوقود النووي المعاد تدويره، والحد من خطورة انتشار الأسلحة النووية، وكذلك اختصار الزمن اللازم لعزل النفايات النووية.

(H.W. هانون)، (E.G. مارش)، (S.G. ستانفورد)

على الرغم من القلق العام القديم حول أمان الطاقة النووية، فإن كثيراً من الناس أخذوا يدركون أنها قد تكون أكثر طرق توليد كميات كبيرة من الكهرباء رفقاً بالبيئة. تقوم عدة دول ـــ من بينها البرازيل والصين ومصر وفنلندا والهند واليابان وباكستان وروسيا وكوريا الجنوبية وفيتنام ـــ ببناء منشآت نووية، أو تخطط لبنائها. ولكن هذا التوجه العام لم يمتد حتى الآن إلى الولايات المتحدة، حيث تعود آخر الأعمال في منشآت كهذه إلى ما قبل 30 عاماً.

قد تكون الطاقة النووية بالفعل، فيما إذا طوّرت بطريقة حساسة، مستدامة لا تنضب، وقد يمكن تشغيلها دون أن تسهم في تغير المناخ. وهناك على وجه الخصوص شكل جديد نسبياً من التقانة النووية قد يتغلب على المثالب الأساسية للطرق الحالية: أي القلق من حوادث المفاعلات، واحتمال تحويل الوقود النووي إلى أسلحة شديدة الفتك، وإدارة النفايات المشعة الخطيرة والطويلة العمر، واستنزاف احتياطيات اليورانيوم العالمية المجدية اقتصادياً. ستجمع دورة الوقود النووي هذه بين اختراعين: المعالجة التعدينية الحرارية[1] (طريقة عالية الحرارة لإعادة تدوير نفايات المفاعلات وتحويلها إلى وقود) ومفاعلات نيوترونات سريعة متقدمة تستطيع حرق ذلك الوقود. يمكن لهذه المقاربة أن ينخفض النشاط الإشعاعي للنفايات المتولدة إلى مستويات آمنة خلال بضع مئات من السنين، مزيلاً بذلك الحاجة إلى عزلها لعشرات الآلاف من السنين.

ولكي تستطيع النيوترونات إحداث انشطارات نووية بفعالية يجب أن تكون حركتها إما بطيئة أو عالية السرعة. تضم معظم منشآت الطاقة النووية الموجودة حالياً ما يدعى مفاعلات حرارية[2]، وهي تشغّل بنيوترونات ذات سرعة (أو طاقة) منخفضة نسبياً تصطدم مرتدة عن قلب المفاعل. وعلى الرغم من أن المفاعلات الحرارية تنتج الحرارة ـــ ومن ثم الكهرباء ـــ بكفاءة عالية، فإنها غير قادرة على تقليل النفايات المشعة الناتجة إلى الحد الأدنى.

(*) العنوان الأصلي: SMARTER USE OF NUCLEAR WASTE

(1) Processing Pyrometallurgical

(2) Thermal Reactors



تنتج جميع المفاعلات الطاقة بشطر نوى ذرات فلز ثقيل (ذي وزن ذريّ عال)، وبشكل رئيسي اليورانيوم أو عناصر مشتقة منه. يوجد اليورانيوم في الطبيعة كخليط من نظيرين: اليورانيوم 235 القابل للانشطار بسهولة (ويقال إنه «انشطاري» fissile) واليورانيوم 238 الأكثر استقراراً بكثير.

يتم قدح نار اليورانيوم في مفاعل ذري والمحافظة على أوارها بوساطة النيوترونات. عندما تُصدم نواة ذرة انشطارية بنيوترون، وخاصة بنيوترون بطيء، فإنها ستنفلق على الأرجح (تنشطر) محررة بذلك كميات كبيرة من الطاقة وعدة نيوترونات أخرى. يمكن عندئذ لبعض هذه النيوترونات المنبعثة أن تصدم ذرات انشطارية مجاورة أخرى مسببة انقسامها ومولدة بذلك تفاعلاً نووياً متسلسلاً[3] تُنقل الحرارة الناتجة إلى خارج المفاعل حيث تحوّل الماء إلى بخار يستخدم لتشغيل عنفات تقود مولدات كهربائية.

(3) Nuclear Chain Reaction

واليورانيوم 238 ليس مادة انشطارية، وإنما يسمى «قابلاً للانشطار» لأنه قد ينفلق أحياناً عند قذفه بنيوترون سريع. كما يقال أحياناً إنه خصب fertile لأنه عندما تمتص ذرة يورانيوم 238 نيوتروناً من دون أن تنشطر، فإنها تتحول إلى البلوتونيوم 239 وهو بدوره انشطاري مثل اليورانيوم 235 ويمكن له المحافظة على بقاء تفاعل متسلسل. بعد نحو ثلاث سنوات من التشغيل، عندما ينزع الفنيون الوقود المستهلك عادة من أحد المفاعلات الحالية بسبب تدني حالته نتيجة الإشعاع واستنفاد اليورانيوم 235 منه، فإن البلوتونيوم يسهم في أكثر من نصف ما تولده المنشأة من كهرباء.

يتم إبطاء (أو تهدئة) النيوترونات في مفاعل حراري ـــ والتي تكون سريعة عند ولادتها ـــ من خلال تأثراتها مع الذرات المجاورة ذات الوزن الذري المنخفض مثل الهيدروجين في الماء الذي يتدفق عبر قلب المفاعل. وجميع المفاعلات النووية التجارية الـــ 440 أو نحوها، باستثناء مفاعلين اثنين، حرارية، ومعظمها ـــ بما فيها مفاعلات الطاقة الأمريكية الـــ 103 ـــ تستعمل الماء لإبطاء النيوترونات ولنقل الحرارة المتولدة بالانشطار إلى المولدات الكهربائية المرافقة. ومعظم هذه الأنظمة الحرارية هي ما يدعوه المهندسون مفاعلات ماء خفيف[4].

نظرة إجمالية / إعادة التدوير النووي[*]

- بغية التقليل من ارتفاع حرارة الكرة الأرضية العالمي بأكبر قدر ممكن، قد تحتاج البشرية إلى توليد القدر الأكبر من الطاقة مستقبلاً باستعمال تقانات الطاقة النووية، وهي لا تطلق أي ثنائي أكسيد الكربون بذاتها.
- في حال إنشاء المزيد من منشآت الطاقة النووية الحرارية (أو النيوترونات البطيئة) الحالية فإن الاحتياطيات العالمية من اليورانيوم المنخفض الثمن ستنضب في بضعة عقود. إضافة إلى ذلك فإن كميات كبيرة من النفايات العالية النشاط الإشعاعي المتولدة فقط في الولايات المتحدة يجب تخزينها لعشرة آلاف سنة على الأقل. وهي أكثر بكثير مما يمكن وضعه في مدفن جبل يوكا في نيـــفادا. والأسوأ من ذلك أن معظم الطاقة التي يمكن استخلاصها من اليورانيوم الأصلي ستكون قد ادّخرت في النفايات.
- إن استعمال دورة وقود نووي جديدة وأكثر فعالية بكثير ـــ تستند إلى مفاعلات النيوترونات السريعة وإعادة تدوير الوقود المستهلك عبر المعالجة المعدنية الحرارية ـــ سيتيح استخدام قدر أكبر بكثير من طاقة اليورانيوم الموجود في الأرض لإنتاج الكهرباء. ستقلل دورة كهذه توليد نفايات المفاعلات الطوية العمر ويمكنها أن تدعم توليد الطاقة النووية إلى ما لا نهاية.

(*) Overview/Nuclear Recycling

في جميع منشآت الطاقة النووية تُستهلك ذرات الفلز الثقيل «باحتراق» الوقود. ومع أن المنشآت تبدأ بوقود غني بمحتواه من اليورانيوم 235، فإن معظم ذلك اليورانيوم السهل الانشطار ينضب بعد نحو ثلاث سنوات. وعندما ينزع الفنيون الوقود المستنفد[5] فإن نحو جزء واحد فقط من عشرين جزءاً من الذرات القابلة للانشطار (اليورانيوم 235 والبلوتونيوم واليورانيوم 238) يكون قد استهلك، ومن ثم فإن ما يسمى الوقود المستهلك مازال يحوي نحو 95% من طاقته الأصلية. إضافة إلى ذلك، يحوّل قرابة العُشْر فقط من خام اليورانيوم المستخرج من المناجم إلى وقود خلال عملية الإثراء (التي يتم خلالها زيادة ملموسة في تركيز اليورانيوم 235). وبذلك فإن أقل من واحد في المئة من إجمالي المحتوى الطاقي للخام يستخدم لتوليد الطاقة في المنشآت الحالية.

تعني هذه الحقيقة أن الوقود المستخدم الناتج من المفاعلات الحرارية الحالية مازال يملك القدرة على إيقاد الكثير من النار النووية. ولما كانت موارد اليورانيوم في العالم محدودة، والعدد المتنامي باستمرار من المفاعلات الحرارية قد يستنفد احتياطيات اليورانيوم المتوافرة المنخفضة التكلفة خلال بضعة عقود، فمن غير المعقول أن يرمى بهذا الوقود المستهلك أو «البقايا» المتبقية من عملية الإثراء.

يتألف الوقود المستهلك من ثلاثة أصناف من المواد: نواتج الانشطار التي تشكل نحو 5 في المئة من الوقود المستخدم، وهي النفاية الحقيقية أو رماد النار الانشطارية إن شئت. وهي تتكوّن من مزيج من عناصر أخف نشأت عندما انشطرت الذرات الثقيلة. يكون هذا المزيج ذا نشاط إشعاعي عال في البداية لعدة سنوات، وبعد عقد أو نحوه يغلب على النشاط الإشعاعي نظيران: السيزيوم 137 والسترونسيوم 90. وكلاهما يذوب في الماء. ومن ثم يجب احتواؤها بشكل مأمون تماماً. يضمحل النشاط الإشعاعي لهذين النظيرين في ثلاثة قرون تقريباً بعامل 1000 وعندها يزول خطرهما عملياً.

يشكل اليورانيوم معظم الوقود النووي المستهلك (نحو 94 في المئة)، وهو يورانيوم غير منشطر يكون قد فقد معظم ما يحويه من اليورانيوم 235، وهو يشابه اليورانيوم الطبيعي (الذي يحوي بالكاد 0.71 في المئة من اليورانيوم 235 الانشطاري). هذا المكوّن متوسط النشاط الإشعاعي، وعند فصله عن نواتج الانشطار وباقي المواد في الوقود المستهلك يمكن خزنه بسهولة للاستخدام المستقبلي بشكل آمن ضمن منشآت محمية عادية.

إن الجزء الموازن من المواد ـــ وهو الجزء الذي يشكل مشكلة فعلية ـــ يشمل عناصر ما بعد اليورانيوم

---

(4) LIGHT-WATER REACTORS

(5) يُعرّف الاستنفاد DEPLETION بأنه النسبة المئوية للنقص في عدد الذرات القابلة للانشطار في مجموعات الوقود نتيجة لاستهلاكها في المفاعل النووي.

TRANSURANIC، وهي عناصر أثقل من اليورانيوم[6]. وهذا الجزء من الوقود عبارة عن مزيج من نظائر البلوتونيوم مع قدر ملموس من الأمريشيوم AMERICIUM. وعلى الرغم من أن نظائر ما بعد اليورانيوم لا تشكل سوى واحد في المئة من الوقود المستهلك فإنها تشكل المصدر الأساسي لمشكلة النفايات النووية الحالية. يمتد عمر النصف لهذه الذرات (أي الفترة الزمنية التي ينتصف فيها النشاط الإشعاعي) حتى عشرات الآلاف من السنين، وهذه الخاصية جعلت المنظِّمين في حكومة الولايات المتحدة يفرضون أن يعزل مخزن النفايات النووية العالية المستوى المزمع إنشاؤه في جبل يوكا بنيـڤادا الوقود المستهلك لفترة تزيد على عشرة آلاف سنة.

استراتيجية بالية(*)

توقع المهندسون النوويون الأوائل أنه سيجري فصل البلوتونيوم المتشكل في وقود المفاعلات الحرارية المستهلك ومن ثم يعاد استخدامه في مفاعلات النيوترونات السريعة والتي تسمى مفاعلات ولودة سريعة[7]؛ لأنها مصممة لإنتاج بلوتونيوم أكثر مما تستهلك. تصوّر رواد الطاقة النووية أيضاً اقتصاداً يتضمن تجارة حرة بالبلوتونيوم. بيد أن البلوتونيوم يصلح للاستخدام في صنع القنابل. ومع انتشار التقانة النووية خارج الدول العظمى الرئيسية فإن هذا الاستخدام المحتمل أدى إلى قلق من انتشار الأسلحة الذرية بشكل غير قابل للسيطرة عليه إلى دول أخرى أو حتى إلى مجموعات إرهابية.

عالجت اتفاقية عدم الانتشار النووي هذه المعضلة جزئياً عام 1986. يمكن للدول الراغبة في جني فوائد تقانة الطاقة النووية أن توقّع الاتفاقية وتعد بألا تحوز أسلحة نووية؛ وبناء على ذلك توافق الأمم التي تمتلك أسلحة على مساعدة الآخرين في تطبيقاتها السلمية. ورغم أن كادرا (فريقاً) Cadre من المفتشين الدوليين قام منذئذ بمراقبة التزام الأعضاء بالاتفاقية، فإن فعالية هذه الاتفاقات الدولية كانت متفاوتة لأنها افتقرت إلى السلطة الفعالة ووسائل التنفيذ الجبري.

يحتاج مصممو الأسلحة النووية إلى بلوتونيوم ذي محتوى عالٍ جداً من نظير البلوتونيوم 239، في حين يحتوي البلوتونيوم الناتج من منشآت الطاقة التجارية عادة على مقادير ملموسة من نظائر بلوتونيوم أخرى مما يجعلها صعبة الاستخدام في قنبلة. ومع ذلك

[6] العناصر الترانسيورانية، أو عناصر ما بعد اليورانيوم TRANSURANIC ELEMENTS هي مايلي اليورانيوم من عناصر في الجدول الدوري، أي ما يزيد عدده الذري على 92.

(*) An Outdated Strategy

[7] fast breeder reactors

فإن استخدام البلوتونيوم الموجود في الوقود المستهلك في الأسلحة ليس أمراً يستحيل تصوّره. لذلك فقد حظر الرئيس الأمريكي السابق (جيمي كارتر) إعادة المعالجة المدنية للوقود النووي في الولايات المتحدة عام 1977. وقد برّر ذلك بأنه مادام لم يجر بعد استعادة البلوتونيوم من الوقود المستهلك، فإنه لا يمكن استخدامه لصنع قنابل. أراد (كارتر) أيضاً أن تكون أمريكا مثالاً لباقي العالم، ولكن فرنسا واليابان وروسيا والمملكة المتحدة لم تحذُ حذوه، ولذلك فإن إعادة معالجة البلوتونيوم لاستخدامه في منشآت الطاقة مستمرةٌ في عدد من الدول.

مقاربة بديلة(*)

عندما أصدر الحظر كانت «إعادة المعالجة» مرادفاً لطريقة «بوريكس» PUREX (مصطلح مشتق من استخلاص البلوتونيوم واليورانيوم)[8]، وهي تقانة تم تطويرها لاستيفاء الحاجة إلى بلوتونيوم نقي كيميائياً لأغراض الأسلحة الذرية. ولكن مفاعلات النيوترونات السريعة الحديثة تتيح استراتيجية إعادة تدوير بديلة لا تتضمن بلوتونيوم نقياً في أي مرحلة. لذلك فإن المفاعلات السريعة تخفض خطورة استخدام الوقود المستهلك الناتج من توليد الطاقة في إنتاج الأسلحة إلى أدنى حد ممكن، وتؤمّن في الوقت نفسه مقدرة فريدة على استخراج أكبر قدر من الطاقة من الوقود النووي *[انظر الإطار في الصفحة998]*. أنشئت عدة مفاعلات كهذه لتوليد الطاقة ــ في فرنسا واليابان وروسيا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة ومازال اثنان منها قيد التشغيل *[انظر: «الجيل التالي من الطاقة النووية»، العلوم، العددان 6/5 (2002)، ص4]*.

تستطيع المفاعلات السريعة استخلاص قدر أكبر من طاقة الوقود النووي مقارنة بالمفاعلات الحرارية لأن نيوتروناتها المتحركة بسرعة (طاقة أعلى) تسبب انشطارات ذرية أكثر مما تفعل النيوترونات الحرارية البطيئة. تعود هذه الكفاءة إلى ظاهرتين: أولاً، عند سرعات بطيئة يُمتَص عدد أكبر بكثير من النيوترونات في تفاعلات غير انشطارية وتُفقَد. ثانياً، تعمل الطاقة الأعلى لنيوترون سريع على زيادة احتمال انشطار ذرة فلز ثقيل خصب ــ مثل اليورانيوم 238 ــ عند صدمها. وبسبب هذه الحقيقة فلن يكون اليورانيوم 235 والبلوتونيوم 239 فقط مرجّحين لأن ينشطرا في مفاعل سريع، ولكنّ قدراً ملحوظاً من ذرات ما بعد اليورانيوم الثقيلة سيقوم بذلك أيضاً.

(*) An Outdated Strategy

(*) An ALternative Approach

[8] plutonium uranium extraction

نوع جديد من المفاعلات النووية(*)

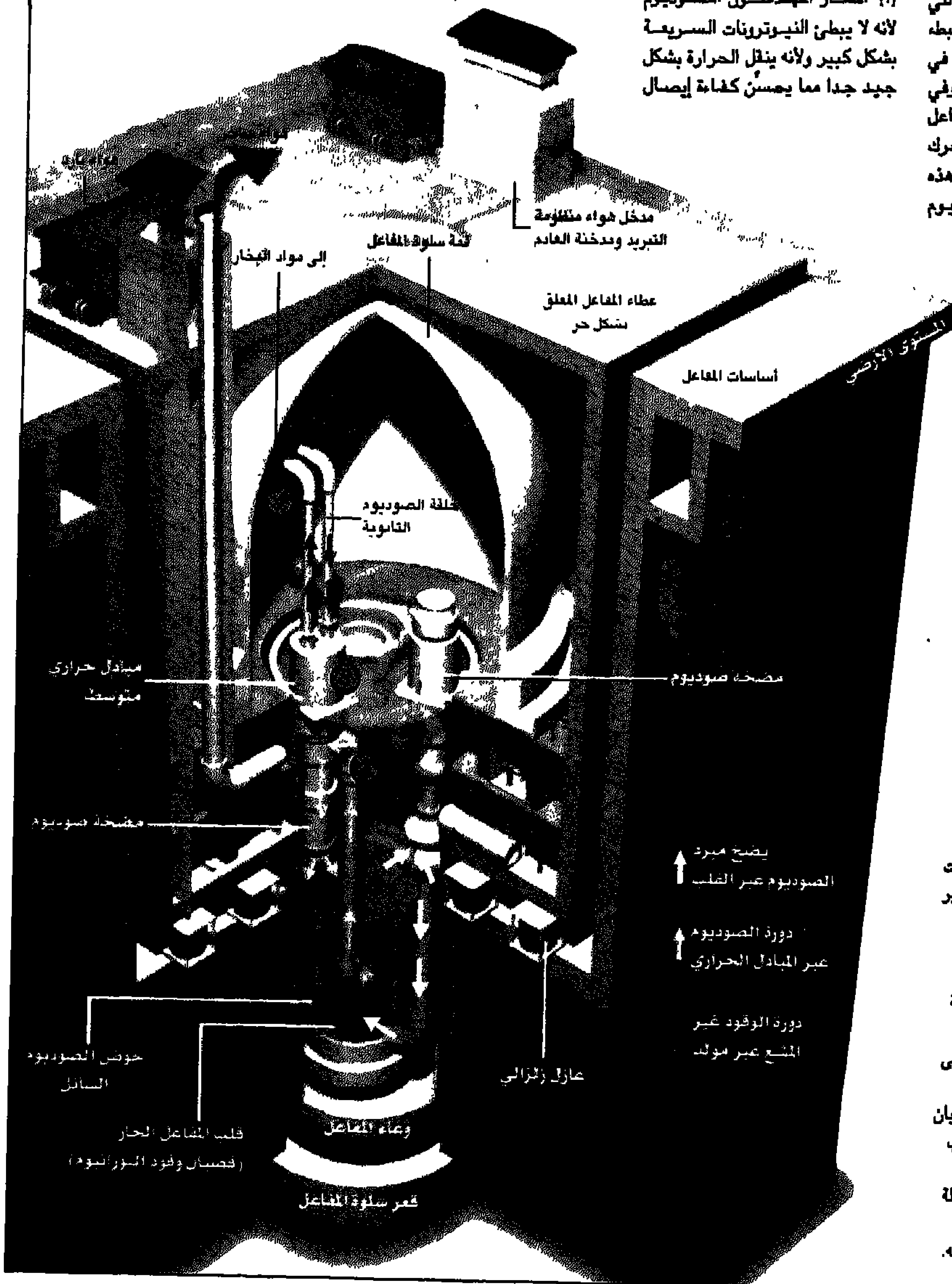
قد تستند دورة طاقة نووية أكثر أمانا واستدامة إلى تصميم مفاعلات الفلز السائل المتقدمة (ALMR) الذي جرى تطويره في ثمانينيات القرن العشرين في مختبر اركون الوطني. وكجميع منشآت الطاقة الذرية فإن منظومة تستند إلى المفاعل ALMR ستستخدم تفاعلات نووية متسلسلة في القلب لإنتاج الحرارة اللازمة لتوليد الكهرباء.

وما يميز المنشآت النووية التجارية الحالية هو المفاعلات الحرارية التي تعتمد على نيوترونات تتحرك ببطء نسبيا لنشر التفاعلات المتسلسلة في وقود اليورانيوم والبلوتونيوم. وفي المقابل فإن منظومة تستند إلى المفاعل ALMR ستستخدم نيوترونات تتحرك بسرعة (ذات طاقة عالية). تتيح هذه العملية استهلاك كامل اليورانيوم والذرات الأثقل متيحة بذلك التقاط قدر أكبر بكثير من طاقة الوقود وسيحرق المفاعل الجديد وقودا مصنّعا من إعادة تدوير وقود المفاعلات الحرارية المستهلك.

وفي معظم تصاميم المفاعلات الحرارية يغمر الماء القلب ليبطئ (يهدئ) النيوترونات ويبقيه باردا أما المفاعل ALMR فهو يستخدم حوضا من الصوديوم السائل الدائر كمبرد [1] اختار المهندسون الصوديوم لأنه لا يبطئ النيوترونات السريعة بشكل كبير ولأنه ينقل الحرارة بشكل جيد جدا مما يحسّن كفاءة إيصال الحرارة إلى منشأة توليد الكهرباء.

وسيعمل مفاعل سريع على النحو التالي تؤدي النار النووية المتقدة في القلب إلى تسخين الصوديوم السائل المشع المار فيه. يضخ بعض الصوديوم المسخّن إلى مبادل حراري متوسط [2] حيث سينقل الطاقة الحرارية إلى الصوديوم السائل غير المشع الذي يتدفق في الأنابيب الملاصقة والمنفصلة [3] من حلقة الصوديوم الثانوية ينقل الصوديوم غير المشع بدوره [4] الحرارة إلى مبادل الحرارة النهائي/مولد البخار (غير ظاهر) حيث يجري توليد البخار في الأنابيب المجاورة المملوءة بالماء. يستعمل البخار الساخن العالي الضغط بعدئذ لإدارة توربينات (عنفات) بخارية تُشغّل المولدات المنتجة للكهرباء (غير ظاهر).

(*) New Types of Nuclear Reactors
(**) Reactor Safe guards



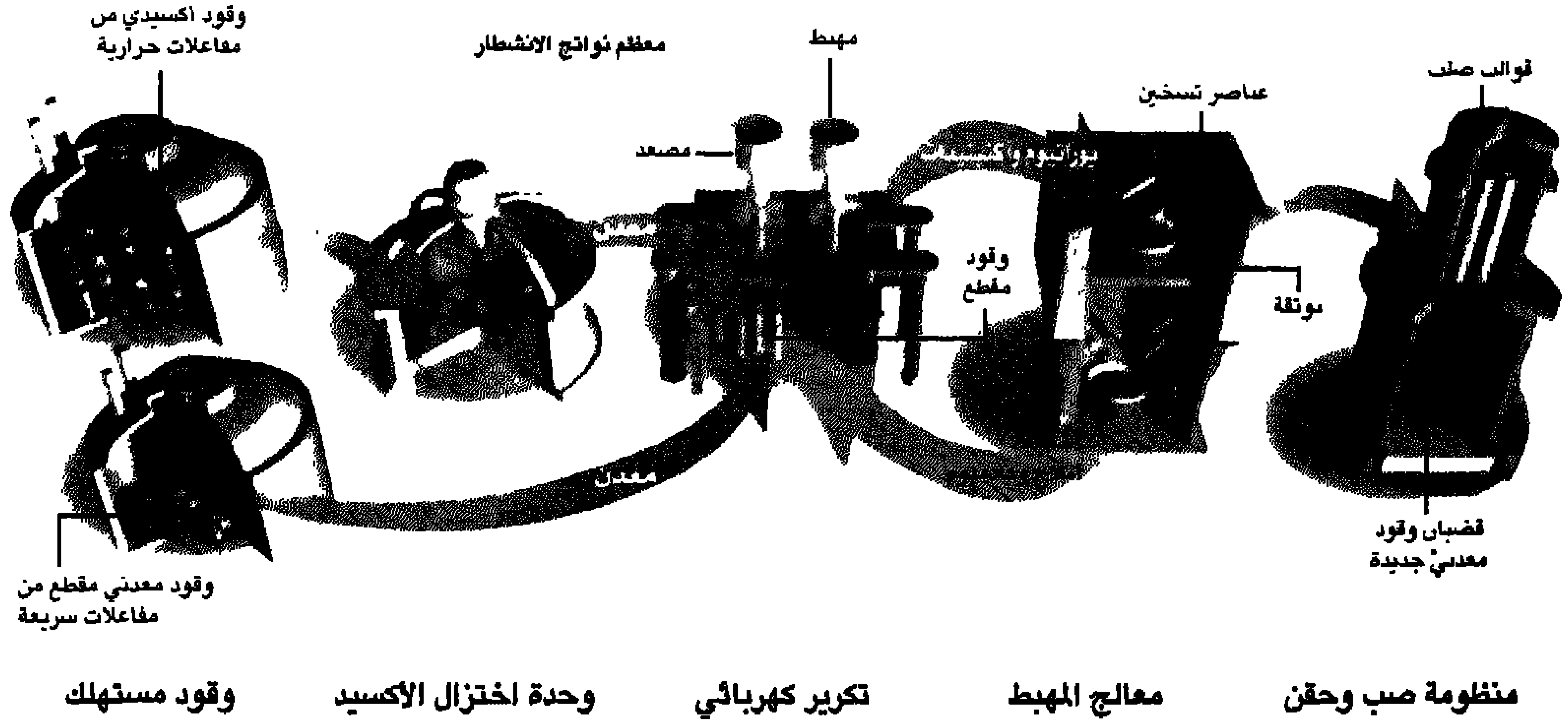
ضمانات المفاعل(**)

- خلال التشغيل تدفع مضخات ذات استطاعة عالية مبرد الصوديوم عبر القلب. إذا تعطلت المضخات فإن الجانبية ستنير المبرد.
- إذا تعطلت مضخات المبرد أو توقفت، فإن تجهيزات أمان خاصة ستتيح أيضا لنيوترونات إضافية التسرب إلى خارج القلب مؤدية إلى خفض حرارته.
- في حال الطوارئ تدخل ستة قضبان تحكم ماصة للنيوترونات في القلب لإيقافه فورا.
- وإذا استمرت التفاعلات المتسلسلة فإن آلاف الكرات من كربيد البور سترمى في القلب ما يضمن إيقافه.

طريقة جديدة لإعادة استخدام الوقود النووي(*)

إن المدخل إلى إعادة التدوير التعديني الحراري للوقود النووي هو إجراءات التكرير الكهربائي electro-refining تنزع هذه العملية النفايات الحقيقية، أي نواتج الانشطار، من اليورانيوم والبلوتونيوم والأكتينيدات الأخرى (عناصر مشعة ثقيلة) في الوقود النووي تبقى الأكتينيدات ممتزجة مع البلوتونيوم بحيث لا يمكن استخدامه مباشرة في الأسلحة

سيخضع الوقود المستهلك من المفاعلات الحرارية الحالية (اكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم) أولا إلى اختزال الاكسيد لتحويله إلى فلز، في حين يذهب وقود اليورانيوم والبلوتونيوم الفلزي من المفاعلات السريعة مباشرة إلى المكرر الكهربائي. يشابه التكرير الكهربائي الطلاء الكهربائي يغطس الوقود النووي المرتبط بمهبط في حمام كيميائي. يطلي التيار الكهربائي اليورانيوم والأكتينيدات الأخرى على المصعد. ثم ترسل العناصر المستخلصة إلى معالج المصعد لنزع ما تبقى من أملاح وكادميوم بعد التكرير. أخيرا يسبك اليورانيوم المتبقي والأكتينيدات في قضبان وقود طازج، ويعاد تدوير الأملاح والكادميوم.



لا يمكن استخدام الماء في مفاعل سريع لنقل الحرارة من القلب، لأنه سوف يبطئ النيوترونات السريعة. لذا يستخدم المهندسون عادة فلزاً سائلاً مثل الصوديوم كمبرِّد وناقل للحرارة. يتمتع الفلز السائل بميزة واحدة كبيرة مقارنة بالماء: تعمل المنظومات المبردة بالماء تحت ضغط عالٍ جداً بحيث إنّ تشققاً صغيراً قد يتطور بسرعة إلى إطلاقات كبيرة من البخار، وربما إلى كسر خطير في أنبوب مسبباً فقداناً سريعاً لمبرد المفاعل. أما منظومات الفلز السائل فتعمل تحت الضغط الجوي، لذلك فهي تشكل احتمالاً أقل بكثير لحدوث إطلاق كبير. مع ذلك فإن الصوديوم يشتعل عند تعرضه للماء مما يوجب إدارته بحذر. لقد تكدّست خبرة صناعية ملموسة بالتعامل مع هذه المادة عبر السنين، كما تطورت طرق الإدارة بصورة جيدة. ومع ذلك فقد حدثت حرائق صوديوم، ودون شك سيكون هناك المزيد. بدأت إحدى حرائق الصوديوم عام 1995 في مفاعل مونجو السريع في اليابان. وقد أدى ذلك إلى إفساد بناء المفاعل، ولكنه لم يشكل قط تهديداً لسلامة المفاعل ولم يتأذَّ أحد أو يتعرض للإشعاع. لا يعتبر المهندسون قابلية الصوديوم للاشتعال مشكلة كبيرة.

بدأ باحثون في مختبر أرگون الوطني بتطوير تقانة المفاعلات السريعة في خلال خمسينيات القرن العشرين. ثم وجهت هذه الأبحاث في الثمانينيات نحو مفاعل سريع (سُمّي مفاعل الفلز السائل المتقدم[9] ALMR) ذي وقود فلزي مبرد بفلز سائل كان سيدمج مع وحدة معالجة تعدينية حرارية ذات حرارة عالية بهدف إعادة تدوير الوقود وإعادة تعبئته. تتبّع المهندسون النوويون أيضاً عدة أفكار أخرى للمفاعلات السريعة يستخدم بعضها وقود اليورانيوم أو البلوتونيوم الفلزي، في حين يستخدم بعضها الآخر وقوداً أكسيدياً. استخدمت مبردات من الرصاص المنصهر ومحلول الرصاص — بيزموث. يعد الوقود الفلزي المستخدم في المفاعل ALMR ذا أفضلية على الأكاسيد لعدة أسباب: فهو يتمتع ببعض ميزات الأمان، ويسمح بتوليد وقود جديد بصورة أسرع ويمكن مزاوجته مع إعادة التدوير التعديني الحراري بصورة أسهل.

المعالجة الحرارية(**)

تستخلص المعالجة المعدنية الحرارية (اختصاراً: بيرو Pyro، أو المعالجة الحرارية) من الوقود المستخدم مزيجاً من عناصر ما بعد اليورانيوم بدلاً من البلوتونيوم الصرف كما في طريقة بوريكس. وهي تستند إلى طلاء كهربائي، أي استخدام الكهرباء لتجميع فلز مستخلص بشكل أيونات من حمام كيميائي على قطب فلزي موصل (ناقل). وقد اشتق اسمها من درجات الحرارة العالية التي يجب تعريض الفلزات لها خلال العملية. جرى تطوير مقاربتين متشابهتين: إحداهما في الولايات المتحدة والأخرى في روسيا. الفرق الرئيسي هو أن الروس يعالجون وقوداً سيراميكياً (أكسيداً)، في حين أن الوقود في المفاعل ALMR فلزي.

---

(9) the advanced liquid-metal reactor

(*) New Way to Use Nuclear Fuel

(**) .Pyroprocessing

(*) New Way To Use Nuclear Fuel

في المعالجة الحرارية الأمريكية *[انظر الإطار في الصفحة المقابلة]* يقوم الفنيون بحل الوقود الفلزي المستهلك في حمّام مائي، ثم يقوم تيار كهربائي قوي بتجميع انتقائي للبلوتونيوم وعناصر ما بعد اليورانيوم الأخرى مع بعض نواتج الانشطار والكثير من اليورانيوم على قطب كهربائي. تبقى معظم نواتج الانشطار وبعض اليورانيوم في الحمّام. عندما تتجمع دفعة كاملة يقوم الفنيون بنزع الأقطاب وكشط المواد المتجمعة عن القطب وصهرها ثم يصبونها في قالب، ويرسل القالب إلى خط إعادة تصنيع لتحويلها إلى وقود مفاعل سريع. عندما يشبع الحمّام بنواتج الانشطار يقوم الفنيون بتنظيف المحلول ويعالجون نواتج الانشطار المستخلصة بغية التخلص الدائم منها.

لذلك — وخلافاً لطريقة بوريكس الحالية — فإن المعالجة الحرارية تجمع عملياً جميع عناصر ما بعد اليورانيوم (بما فيها البلوتونيوم) مع جزء ملموس من اليورانيوم ونواتج الانشطار. وينتهي قدر صغير جداً من مكوّن ما بعد اليورانيوم في مجرى النفايات النهائي مما يقلل الزمن اللازم للعزل بشكل كبير. إن تجميع نواتج الانشطار مع مواد ما بعد اليورانيوم غير ملائم للأسلحة ولا حتى لوقود المفاعلات الحرارية. من ناحية ثانية، لا يعد هذا المزيج مقبولاً فقط وإنما هو مفيد في وقود المفاعلات السريعة.

وعلى الرغم من أن تقانة إعادة التدوير التعديني الحراري ليست جاهزة تماماً للاستخدام التجاري الفوري فإن الباحثين بينوا مبادئها الأساسية، وتم عرضها بنجاح على مستوى الريادة في منشآت طاقة عاملة في كل من الولايات المتحدة وروسيا. ولكنها لم تعمل بعد على نطاق الإنتاج الكامل.

مقارنة الدورات(*)

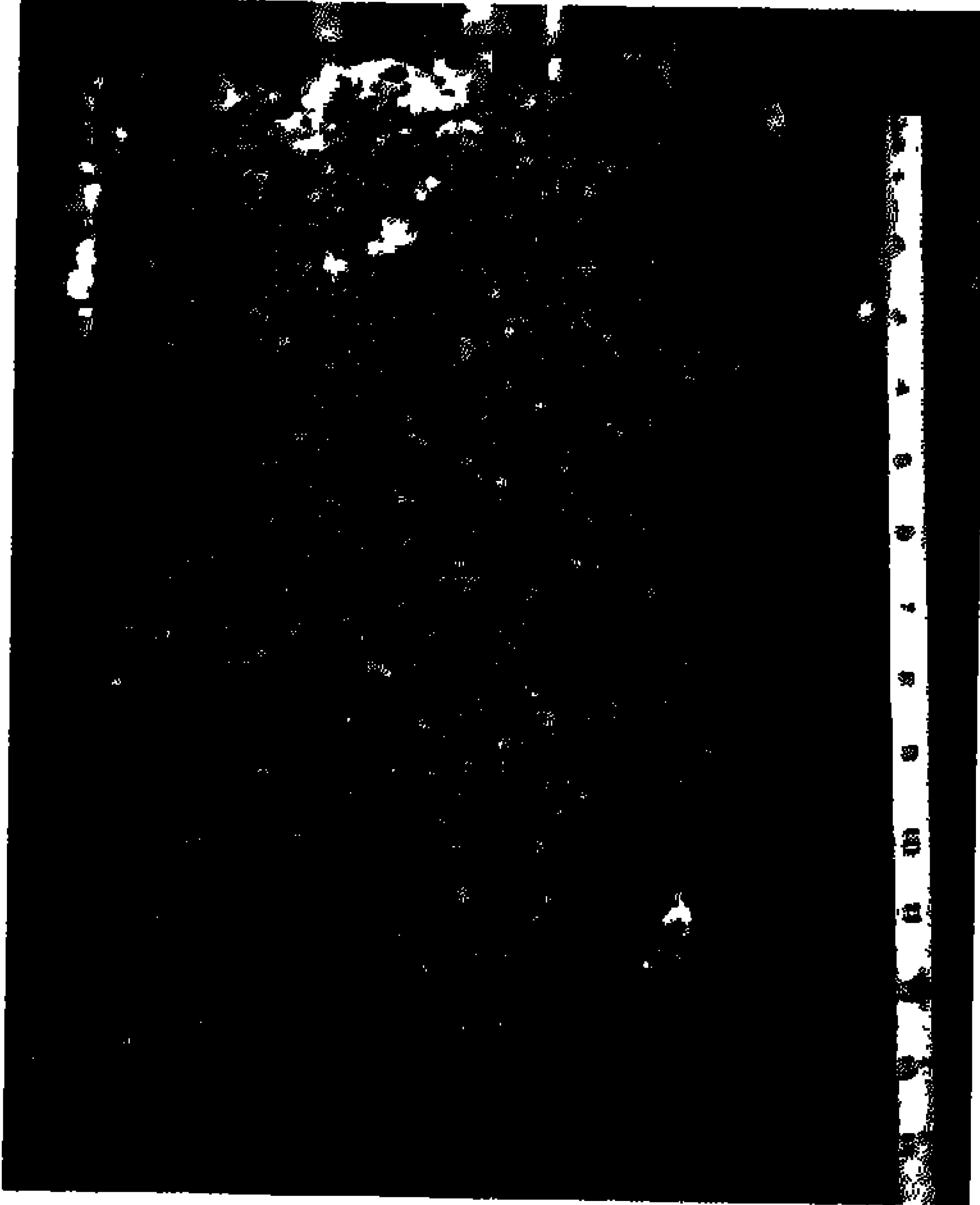
تتشابه الإمكانات التشغيلية للمفاعلات السريعة والحرارية من عدة أوجه، ولكن الفروق جسيمة في نواح أخرى *[انظر الإطار في الصفحة 1000]*. فعلى سبيل المثال تنتج منشأة مفاعل حراري قدرته الكهربائية 1000 ميغاواط أكثر من 100 طن من الوقود المستهلك في السنة. على النقيض من ذلك فإن النفايات المتولدة سنوياً من مفاعل سريع له نفس الاستطاعة الكهربائية، تتجاوز بقليل الطن الواحد من نواتج الانشطار، إضافة إلى كميات ضئيلة من عناصر ما بعد اليورانيوم.

ستكون إدارة النفايات باستخدام دورة المفاعل ALMR مبسّطة بشكل كبير. ولما كانت نفايات المفاعلات السريعة لا تحوي كميات ملموسة من عناصر ما بعد اليورانيوم طويل عمر النصف، فإن إشعاعها سيتفكك إلى مستوى الفلز الذي استخرج منه خلال بضع مئات من السنين بدلاً من عشرات الألوف.

إذا استخدمت حصراً المفاعلات السريعة فإن نقل المواد ذات النشاط الإشعاعي العالي لن يجري إلا في حالتين؛ عند نقل نفايات نواتج الانشطار إلى جبل يوكا أو موقع بديل للتخلص منها، أو عند نقل وقود الإقلاع إلى مفاعل جديد. إن تجارة البلوتونيوم ستكون فعلياً قد أزيلت.

يدافع بعض الناس بأن الولايات المتحدة تعمل على برنامج مكثف لمعالجة الوقود المستهلك بطريقة بوريكس التي تنتج مزيجاً من أكاسيد اليورانيوم والبلوتونيوم لإعادتها إلى مفاعلات حرارية. وعلى الرغم من أن طريقة مزيج الأكاسيد[10] MOX تستخدم حالياً لإتلاف فائض بلوتونيوم الأسلحة بحيث يمتنع استخدامه في قنابل — وهي فكرة جيدة — فإننا نعتقد أنه من الخطأ نشر البنية التحتية لبوريكس الأكبر بكثير التي ستلزم لمعالجة الوقود المدني. إن كسب الموارد سيكون متوسطاً، في حين تبقى مشكلة النفايات الطويلة المدى، وجميع هذه الجهود لن تؤجل الحاجة إلى مفاعلات سريعة فعالة إلا لفترة قصيرة فقط.

إن منظومة مكونة من مفاعل سريع والمعالجة الحرارية متعددة المزايا بشكل استثنائي يمكن لها أن تكون مستهلكاً صرفاً للبلوتونيوم أو منتجاً صرفاً له، كما يمكن تشغيلها في نمط متعادل من دون ربح أو خسارة. يمكن للمنظومة عند تشغيلها كمنتج صرف، أن تؤمن مواد إقلاع لمنشآت مفاعلات طاقة سريعة أخرى. يمكن لها، كمستهلك صرف، استنفاد البلوتونيوم الفائض ومواد الأسلحة. عند اختيار نمط التعادل فإن الوقود الإضافي الذي تحتاج إليه المنشأة النووية لن يكون سوى صب (سكب) دوري لليورانيوم المستنفد (يورانيوم تم نزع معظم اليورانيوم الانشطاري 235 منه) لتعويض ذرات المعدن الثقيل التي انشطرت.



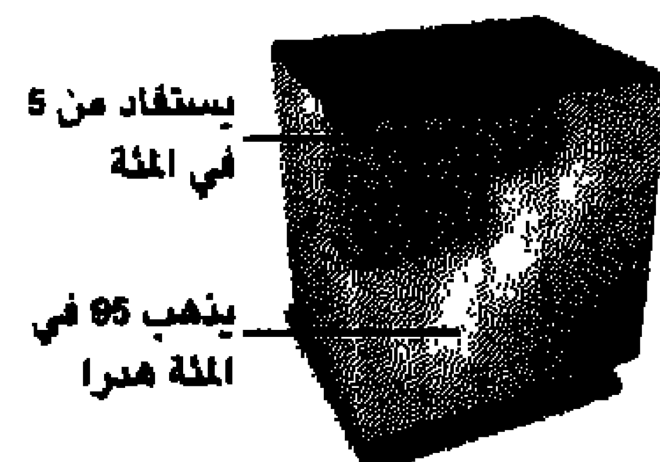
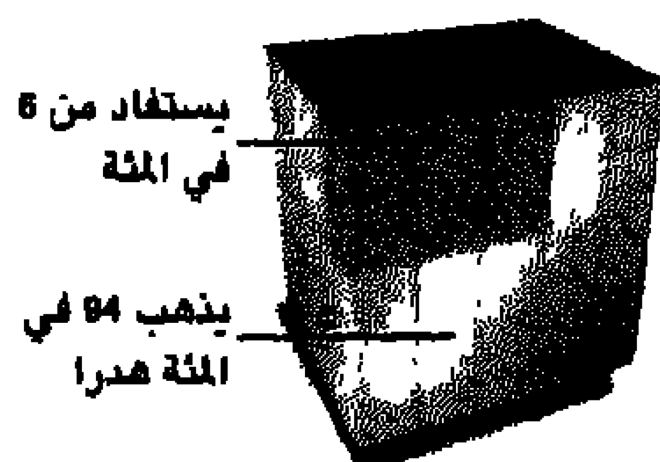
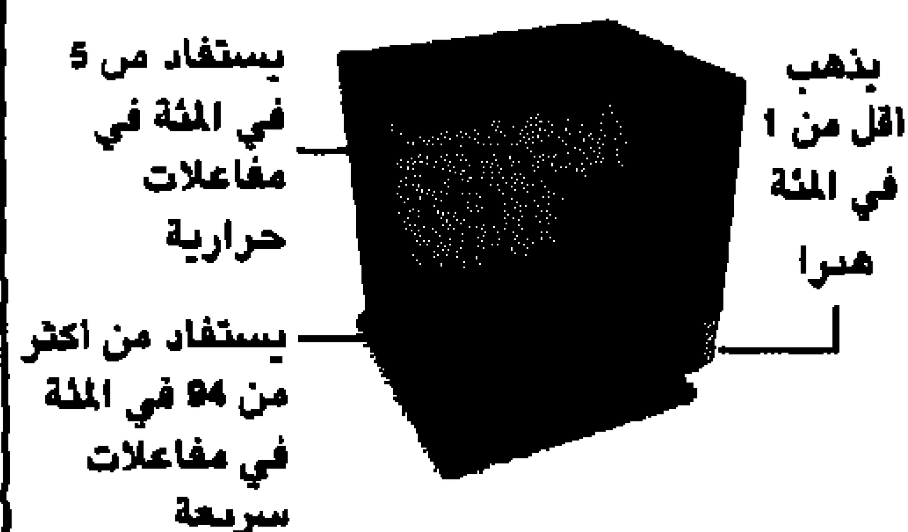
تستخلص عناصر اليورانيوم والأكتينيدات من وقود مفاعلات حرارية مستهلك وتطلى على مصعد وحدة تكرير كيميائية خلال إجراء معالجة حرارية. بعد معالجة أخرى يمكن حرق الوقود الفلزي في مفاعلات النيوترونات السريعة.

(*) Comparing Cycles

(10) mixed oxide method.

مقارنة ثلاث دورات للوقود النووي(*)

يمكن استخدام ثلاث مقاربات لحرق الوقود النووي والتعامل مع نفاياته. فيما يلي عدد من مزاياها.

مسلك المرة الواحدة	إعادة تدوير البلوتونيوم	إعادة تدوير الوقود
يحرق الوقود في مفاعلات حرارية ولا تعاد معالجته. تطبق في الولايات المتحدة.	يحرق الوقود في مفاعلات حرارية، بعدها يستخلص البلوتونيوم باستخدام معالجة بوريكس. تطبق في دول متقدمة أخرى.	يحرق الوقود المعاد تدويره عبر معالجة معدنية حرارية في مفاعلات نيوترونات سريعة متقدمة. نموذج أولي من التقانة.
استخدام الوقود		
		
يستفيد من قرابة 5 في المئة من الطاقة الموجودة في وقود مفاعل حراري وأقل من 1 في المئة من الطاقة الموجودة في فلز اليورانيوم (المصدر الأساسي للوقود). لا يستطيع حرق اليورانيوم المستنفد (الجزء المنزوع من الفلز عند إغنائه) أو اليورانيوم الموجود في الوقود المستهلك.	يستفيد من نحو 6 في المئة من الطاقة الموجودة في وقود المفاعل الأصلي وأقل من 1 في المئة من الطاقة الموجودة في فلز اليورانيوم. لا يستطيع حرق اليورانيوم المستنفد أو اليورانيوم الموجود في الوقود المستهلك.	يستطيع استرجاع أكثر من 99 في المئة من الطاقة الموجودة في وقود المفاعلات الحرارية المستهلك. عند نفاد وقود المفاعلات النووية المستهلك يمكن أن يحرق اليورانيوم المستنفد واسترجاع أكثر من 99 في المئة من الطاقة المتبقية في فلز اليورانيوم.
المنشآت والعمليات اللازمة		
الأحمر: يتطلب حمايات مادية شديدة.	البرتقالي: يحتاج فقط إلى حمايات مادية متوسطة.	الأزرق: خطورة محتملة على الأجيال القادمة.
مناجم يورانيوم إغناء الوقود لتركيز اليورانيوم الانشطاري. تصنيع الوقود. منشآت طاقة. مخزن مؤقت للنفايات (إلى أن يمكن التخلص النهائي من النفايات). مخزن دائم قادر على عزل النفايات بشكل آمن لعشرة الآف سنة. (لا يحتاج إلى تعامل بالبلوتونيوم أو عمليات معالجة نفايات).	مناجم يورانيوم. إغناء الوقود. خلط بلوتونيوم (مزج). تصنيع وقود خارج الموقع. إعادة معالجة بطريقة بوريكس خارج الموقع. منشآت طاقة. مخزن مؤقت للنفايات. معالجة النفايات خارج الموقع. مخزن دائم قادر على عزل النفايات بشكل آمن لعشرة الآف سنة.	تصنيع وقود ضمن الموقع. معالجة معدنية حرارية ضمن الموقع (إعادة تدوير فورية للوقود المستهلك). منشآت طاقة. معالجة الوقود ضمن الموقع. مخزن قادر على عزل النفايات لأقل من 500 سنة. (لا حاجة إلى التعدين لقرون؛ لا حاجة إلى إغناء اليورانيوم أبدا).
مصير البلوتونيوم		
يزداد مخزون البلوتونيوم في الوقود المستعمل باطراد ينخفض فائض البلوتونيوم الصالح للأسلحة ببطء عبر مزجه في وقود طازج	يزداد مخزون البلوتونيوم في الوقود المستعمل وهو متاح للتجارة الاقتصادية. ينخفض فائض البلوتونيوم الصالح للأسلحة ببطء عبر مزجه في وقود طازج	يتناقص المخزون في آخر الأمر إلى ما هو موجود في المفاعلات وفي إعادة التدوير. يمكن أن ينخفض فائض البلوتونيوم الصالح للأسلحة بسرعة. البلوتونيوم الموجود في الوقود غير نقي لدرجة أنه لا يصلح للتحويل إلى أسلحة.
نوع النفايات		
يعزل الوقود المستعمل الغني بالطاقة في حاويات ومنشآت تخزين تحت أرضية. النفايات نشيطة إشعاعيا لدرجة أنه يمكن تعريفها بأنها • محمية ذاتيا • لبضع مئات من السنين ضد معظم المجموعات الراغبة بالحصول على البلوتونيوم 239 لصنع أسلحة نووية.	نفايات مزججة غنية بالطاقة وثابتة لدرجة عالية. النفايات نشيطة إشعاعيا لدرجة أنه يمكن تعريفها بأنها • محمية ذاتيا • لبضع مئات من السنين ضد معظم المجموعات الراغبة في الحصول على البلوتونيوم 239 لصنع أسلحة نووية.	يمكن إعداد أشكال النفايات حسب الطلب ولا تحتاج إلى المحافظة عليها إلا لـ 500 سنة وبعدها لن تكون المواد خطرة. نظرا لعدم وجود البلوتونيوم فلن تكون النفايات صالحة لصنع الأسلحة.

Comparing Three Nuclear Fuel Cycles (*)

أظهرت دراسات الأعمال أن هذه التقانة يمكن أن تكون منافسة اقتصادياً لتقانات الطاقة النووية الحالية *(انظر بحث «تبرلي» ضمن «مراجع للاستزادة» في أسفل الصفحة)*. من المؤكد أن إعادة التدوير التعدينية الحرارية ستكون أرخص بكثير من إعادة التدوير بطريقة بوريكس، بيد أنه في الحقيقة لا يمكن معرفة قابلية المنظومة للبقاء اقتصادياً ما لم يتم إثباتها.

إن الاقتصاديات الكلية لأي مصدر طاقة لا تعتمد فقط على التكاليف المباشرة، بل تعتمد أيضاً على ما يدعوه الاقتصاديون «الخارجيات» externalities، وهي تكاليف مفاعيل خارجية يصعب تقديرها كمياً تنجم عن استخدام التقانة. على سبيل المثال عندما نحرق الفحم أو النفط لتوليد الطاقة فإن مجتمعاتنا تتقبل الآثار الصحية الضارة والتكاليف البيئية التي تتضمنها. لذلك فإن التكاليف الخارجية في الواقع تناصر توليد طاقة الوقود الأحفوري، إما مباشرة أو عبر آثار غير مباشرة على المجتمع ككل. وعلى الرغم من صعوبة تقدير «الخارجيات» فإن المقارنات الاقتصادية التي لا تأخذها بعين الاعتبار ستكون غير واقعية ومضللة.

الربط بين أنماط المفاعلات (*)

إذا دخلت المفاعلات المتقدمة حيز الاستخدام، فإنها ستحرق في البداية وقود المفاعلات الحرارية المستهلك الذي جرت إعادة تدويره بمعالجة حرارية. ستنقل هذه النفايات، وهي مخزنة بشكل مؤقت حالياً في الموقع، إلى منشآت تستطيع معالجتها في ثلاث قنوات خرج: القناة الأولى تكون عالية النشاط الإشعاعي، وتضم معظم نواتج الانشطار مع قدر ضئيل لا يمكن تجنبه من عناصر ما بعد اليورانيوم، سيتم تحويلها إلى شكل مستقر فيزيائياً ـــ قد تكون مادة شبيهة بالزجاج ـــ ومن ثم تنقل إلى جبل يوكا أو موقع دائم آخر للتخلص النهائي.

والقناة الثانية ستلتقط عملياً جميع عناصر ما بعد اليورانيوم مع بعض اليورانيوم ونواتج الانشطار، وسيجري تحويلها إلى وقود فلزي للمفاعلات السريعة، ومن ثم تحال إلى مفاعلات من النوع ALMR.

والقناة الثالثة التي تبلغ نسبتها نحو 92 في المئة من وقود المفاعلات الحرارية المستهلك ستحوي معظم اليورانيوم، وهو الآن مستنفد ويمكن ادخاره للاستعمال المستقبلي كوقود مفاعل سريع.

لا يمكن بالطبع تحقيق سيناريو كهذا خلال ليلة وضحاها. إذا بدأنا اليوم فإن أول المفاعلات السريعة قد يبدأ العمل بعد نحو 15 سنة. من الجدير بالذكر أن ذلك البرنامج متوافق بشكل معقول مع الجدول الزمني المخطط لإرسال وقود المفاعلات الحرارية المستهلك إلى جبل يوكا. يمكن بدلاً من ذلك إرسالها لإعادة تدويرها كوقود مفاعل سريع.

ومع بلوغ المفاعلات الحرارية الحالية نهاية عمرها التشغيلي يمكن استبدال مفاعلات سريعة بها. إذا تم ذلك فلن تكون هناك حاجة إلى استخراج فلزات اليورانيوم لعقود، ولن تكون هناك أي طلبات أبداً لإثراء اليورانيوم. وعلى المدى الطويل جداً فإن إعادة تدوير وقود المفاعلات السريعة ستكون أمراً فعالاً إلى درجة أن الموارد المتوافرة حالياً من اليورانيوم ستبقى إلى ما لا نهاية.

إن كلاً من الهند والصين أعلنتا أنهما تخططان لتوسعة مصادرهما الطاقية باستخدام المفاعلات السريعة. تدرك أن مفاعلاتهما الأولى ستستخدم وقوداً أكسيدياً أو كربيدياً وليس وقوداً فلزياً ـــ وهو ليس السبيل الأمثل وقد يكون اختياره تم لأن تقانة إعادة المعالجة بوريكس ناضجة، في حين مازالت المعالجة الحرارية غير مثبتة تجارياً.

مازال هناك متسع من الوقت كي تستكمل الولايات المتحدة التطوير الأساسي لمنظومات مفاعلات سريعة/ معالجة حرارية للوقود الفلزي. في المستقبل المنظور تبقى الحقيقة القاسية أن الطاقة النووية فقط هي القادرة على تلبية حاجات البشرية الطويلة الأمد من الطاقة مع المحافظة على البيئة. وكي يستمر توليد طاقة نووية مستدامة على نطاق واسع، يجب أن يدوم توريد الوقود النووي لوقت طويل. ويعني ذلك أن دورة الطاقة النووية يجب أن تتمتع بصفات المفاعل ALMR والمعالجة الحرارية. ويبدو أن الوقت مناسب لاتخاذ هذا المنحى الجديد باتجاه تطوير واع للطاقة.

المؤلفون

William H. Hannum – Gerald E.Marsh – George S. Stanford

فيزيائيون عملوا على تطوير المفاعلات السريعة في مختبرات أركونا الوطنية التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية. (هانوم) رئيس أبحاث تطوير الفيزياء النووية وأمان المفاعلات في وزارة الطاقة. وكان نائب المدير العام لوكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتطوير الاقتصادي في باريس. عمل (مارش)، وهو زميل في الجمعية الفيزيائية الأمريكية، مستشاراً في وزارة الدفاع الأمريكية حول التقانات والسياسات النووية الاستراتيجية في إدارات عدد من الرؤساء السابقين وهو مؤلف مشارك في الكتاب: *The phantom Defense: America's Pursuit of the StarWars Illusion (praeger press)*

أما (ستانفورد) الذي تركزت أبحاثه على الفيزياء النووية التجريبية وفيزياء المفاعلات وأمان المفاعلات السريعة، فهو مؤلف مشارك للكتاب: *Nuclear Shadowboxing: Contemporary Threats from Cold War. Weaponry (Fidlar Doubleday).*

مراجع للاستزادة

Breeder Reactors: A Renewable Energy Source. Bernard L. Cohen in American Journal of physics، vol. 51، No. 1; January 1983.

The Technology of the Integral Fast Reactor and Its Associated Fuel Cycle. Edited by W.H.Hannum. Progress in Nuclear Energy، Special Issue، Vol. 31، Nos. 1-2; 1997.

Integral Fast Reactors: Source of Safe، Abundant، Non-Polluting power. George Stanford. National Policy Analysis Paper # 378; December 2001. Available at www.national center.org/NPA378.htm/

LWR Recycle: Necessity or Impediment? G.S.Stanford in Proceedings of Global 2003.

ANS Winter Meeting، New Orleans، November 16-20، 2003. Available at www.nationalcenter.org/ LWRStanford.pdf

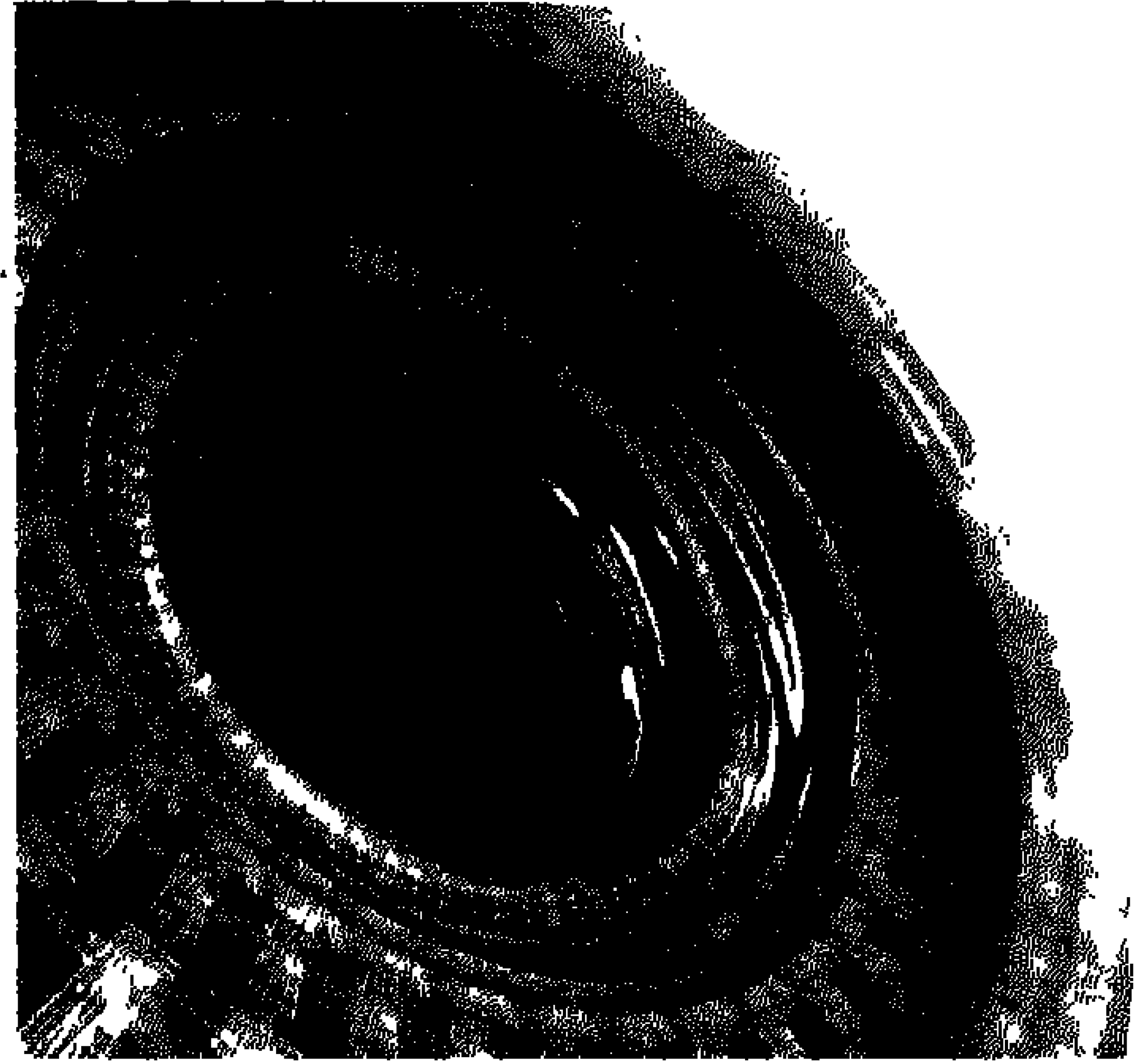
S-PRISM Fuel Cycle Study. Allen Dubberly et al. in Proceedings of ICAPP'03. Córdoba، Spain، May 4-7، 2003، paper 3144.

(*) Coupling Reactor Types

مقابل صوتي للثقوب السوداء(*)

تسلك الموجات الصوتية المنتشرة في مائع سلوك الموجات الضوئية المنتشرة في الفضاء. وحتى الثقوب السوداء لها ما يقابلها صوتياً. أفلا يمكن للزمكان[1] Space-time أن يكون نوعاً خاصاً من الموانع مثل الأثير في فيزياء ما قبل آينشتاين؟

(A.T. جاكوبسون). (R.بارينتاني)



عندما اقترح (A. آينشتاين) نظرية النسبية الخاصة عام 1905، ألقى جانبا بالفكرة التي كانت سائدة في القرن التاسع عشر والقائلة بأن الضوء ناجم عن اهتزازات في وسط افتراضي يسمّى الأثير. وبدلا من ذلك، قدّم (آينشتاين) الدليل على أن الموجات الضوئية يمكن أن تنتقل في الفراغ دون حاجة إلى وجود أي مادة — على خلاف الموجات الصوتية التي تنجم عن اهتزازات في الوسط المادي الذي تنتشر فيه. وهذا الجانب من النسبية الخاصة لم يمسّ في الركنين الآخرين للفيزياء الحديثة، النسبية العامة والميكانيك الكمومي، ويمكن بنجاح تفسير جميع البيانات التجريبية التي لدينا حتى الآن، والتي تغطّي مجالاً واسعاً من المقاييس يمتدّ من المقاييس ما دون النووية إلى المقاييس الفلكية، وذلك من خلال النظريات الثلاث هذه (النسبية الخاصة والعامة والميكانيك الكمومي).

ومع ذلك، يواجه الفيزيائيون مسألة مفاهيمية عميقة. إن نظريتي النسبية العامة والميكانيك الكمومي، كما نفهمهما اليوم، لاتنسجم إحداهما مع الأخرى. وباءت بالفشل جميع محاولات العلماء لدمج الثقالة gravity التي تعزوها النسبية العامة إلى انحناء[2] curvature الزمكان، ضمن الإطار الكمومي. وقد حقّق النظريون تقدّما ضئيلا في فهم بنية الزمكان الشديدة الانحناء التي يتنبأ بها الميكانيك الكمومي عند مسافات متناهية في الصغر. وقادهم ما انتابهم من شعور بالإحباط إلى التماس الإرشاد في مجال غير متوقّع: إنه مجال فيزياء المادة الكثيفة التي تدرس خواصّ المواد العادية مثل البلورات والموائع.

من بُعد، تبدو المادة الكثيفة مستمرّة مثل الزمكان عندما ينظر إليه في المقاييس الكبيرة، ولكنها على خلاف الأخير لها بنية مجهرية يتحكّم فيها الميكانيك الكمومي ونفهمها بشكل جيّد. إضافة إلى ذلك وإلى حد كبير، يماثل انتشار الصوت في مائع هائج انتشارَ الضوء في زمكان منحن. وما نحاوله وزملاؤنا، عبر استخدامنا للموجات الصوتية لدراسة نموذج للثقوب السوداء، هو استغلال هذا التماثل من أجل اكتساب بصيرة خلاّقة وفهم أعمق لكيفية عمل بنية الزمكان الميكروية. ويوحي علمنا بأن بنية الزمكان، حاله في ذلك حال مائع مادّي، قد تكون حبيبية وذات إطار مرجعي[3] مفضل يظهر نفسه عند المقاييس الصغيرة، وذلك على خلاف فرضيات (آينشتاين).

من الثقب الأسود إلى الجمرة الساخنة(**)

تعتبر الثقوب السوداء حقلَ تجاربَ ممتازاً لاختبار نظريات الثقالة الكمومية، لأنها تمثّل أحد الأمكنة النادرة التي نحتاج فيها إلى استخدام كلتا نظريتي الميكانيك الكمومي والنسبية العامة لفهم كيفية عملها. وقد تحقّقت خطوة كبيرة نحو توحيد النظريتين عام 1974 عندما طبّق (هوكنك) [من جامعة كمبردج] الميكانيك الكمومي على دراسة أفق حدث[4] الثقب الأسود.

ووفقاً للنسبية العامة، يمثّل أفق حدث الثقب الأسود السطح الفاصل بين داخل الثقب (حيث الثقالة كبيرة جداً بحيث لايستطيع أي شيء الإفلات منها) وخارجه. وهذا الفاصل ليس مادياً، فالمسافرون السيئو الحظّ لن يشعروا بأي شيء خاص عند

(*) AN ECHO OF BLACK HOLES

(1) نحت من زمان — مكان.

(2) أو تقوس.

(3) frame of reference

(**) From Black Hole to Hot Coal

(4) the event horizon

اجتيازهم هذا الفاصل أثناء سقوطهم نحو الثقب الأسود، ولكنهم إذا فعلوا ذلك فلن يكونوا قادرين على إرسال إشارات ضوئية إلى أناس خارج الثقب، فكيف إذاً بالانتقال والعودة للخارج. وسيقتصر المراقب الخارجي في تسلّمه إشارات المسافرين على تلك التي أرسلوها قبل اجتيازهم للأفق، إذ إن الموجات الضوئية عند تسلّقها لبئر الثقالة المحيطة بالثقب الأسود تمتطّ فينقص تواترها ويزيد دورها. ونتيجة لذلك، سيبدو المسافر بالنسبة إلى المراقب متحركاً حركة بطيئة وأكثر احمراراً من العادة.

يُعرف هذا الأثر بالانزياح التثاقلي نحو الأحمر(5)، وهو ليس خاصية مميّزة للثقوب السوداء وحدها. فمثلاً، يسبّب هذا الأثر أيضاً تغيّر التواتر والزمن الفاصل بين الإشارات الصادرة عن الأقمار الصنعية الدائرة حول الأرض وعن محطّاتها الأرضية، وعلى منظومات تحديد المواقع على الكرة الأرضية GPS أن تأخذ ذلك في الاعتبار عند تحديد دقيق لموقع ما. مع ذلك، ما هو مميّز للثقوب السوداء هو أن هذا الانزياح نحو الأحمر يبلغ قيماً لا متناهية في الكبر عندما يقترب المسافر من أفق الثقب الأسود. ومن وجهة نظر المراقب، يبدو الهبوط وكأنه يستغرق زمناً لا متناهيا في الكبر، مع أن هذا الهبوط نفسه يستغرق وقتا محدوداً بالنسبة إلى المسافر نفسه.

نظرة إجمالية/ الثقوب السوداء الصوتية(*)

- قدّم الفيزيائي الشهير (S. هوكنك) عام 1970 الدليل على أن الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً، لأنها تُصدر وهجاً كمومياً لإشعاع حراري. ولكن هناك مشكلة في تحليل هوكنك تتلخّص في أن الموجات التي تبدأ عند أفق الثقب سوف تمتطّ وفقاً للنظرية النسبية، وسوف يزيد طولها بمقدار لا متناه في الكبر عندما تنتشر بعيداً عن الثقب. لذلك، يجب أن يصدر إشعاع هوكنك من منطقة غاية في الصغر، حيث تهيمن ظواهر الثقالة الكمومية.
- حاول الفيزيائيون الإلمام بكنه هذه المسألة عبر دراستهم نماذجَ لمنظوماتِ موائع شبيهة بالثقوب السوداء. تمنع البنية الجزيئية للمائع الامتطاط اللامتناهي وتستعيض عن الغرائب الميكروية للزمكان بفيزياء معروفة.
- تؤيّد النماذج المشابهة هذه استنتاج هوكنك وتدفع بعض الباحثين إلى اقتراح فكرة أن للزمكان بنية «جزيئية»، وذلك خلافاً لفرضيات النظرية النسبية المتعارفة.

Overview/Acoustic Black Holes(*)

وحتى الآن، تمّت معالجتنا للضوء في وصفنا للثقوب السوداء على أساس اعتباره موجة كهرمغنطيسية تقليدية. وما فعله (هوكنك) هو إعادة تحليل مقتضيات القيمة اللامتناهية في الكبر للانزياح نحو الأحمر عند اعتبار الطبيعة الكمومية للضوء. ووفقاً للنظرية الكمومية، فإن الخلاءَ المثاليّ نفسَه غيرُ فارغ تماماً بل يعجّ بهيجانات وتراوحات ناجمة عن مبدأ الارتياب لهايزنبرك. ويمكن لهذه التموّجات أن تتجسّد بشكل أزواج من الفوتونات الافتراضية والتي ندعوها كذلك، لأنها في زمكان منحن بعيداً عن أيّ تأثير ثقالي، تولد وتفنى بشكل مستمرّ ممّا يجعلها غير قابلة للملاحظة عند غياب أيّ اضطراب.

ولكن يمكن لفرد من زوج افتراضي، في الزمكان المنحني حول ثقب أسود، أن يجري حجزه فيلج داخل الأفق في حين يبقى الآخر خارجه. وعندها يمكن للزوج الافتراضي أن يصبح حقيقياً ما يؤدي إلى تدفّق ضوء نحو الخارج يمكن ملاحظته، ويرافق ذلك نقصان في كتلة الثقب. والنمط الإجمالي للإشعاع هو حراري، مثل حال جمرة ساخنة، بدرجة حرارة متناسبة عكساً مع كتلة الثقب الأسود. تُعرف هذه الظاهرة باسم مفعول هوكنك(6). وما لم يبتلع الثقب كتلة أو طاقة لتعويض ما يفقده، فإن مفعول هوكنك سيجعله يستنفد كامل كتلته.

ولا بدّ من الإشارة هنا إلى نقطة مهمة، ستصبح حاسمة لاحقاً عند اعتبار الأشياء المائعة للثقوب السوداء، وهي بقاء المكان المجاور تماماً لأفق الثقب الأسود في حالة خلاء كمومي تامّ تقريباً. وفي الحقيقة، يُعدّ هذا الشرط أساسياً في برهان هوكنك، لأن الفوتونات الافتراضية خاصية الحالة الكمومية ذات الطاقة الأخفض، أو «الحالة الأساسية»(7). ويمكن للفوتونات الافتراضية أن تصبح حقيقية ولكن فقط عند انفصالها عن شركائها في الأزواج الافتراضية وتسلّقها حقلَ الثقالة بعيداً عن الأفق.

المجهر النهائي(*)

أدى تحليل هوكنك دوراً مركزياً في محاولة بناء نظرية كمومية للثقالة. وتُعتبر القدرة على إعادة استنتاج مفعول هوكنك وإيضاحه اختباراً حاسماً لأي نظرية مرشّحة لأن تكون نظريةَ ثقالة كمومية، مثل نظرية الأوتار(8). ومع أن معظم الفيزيائيين يقبلون بحجج (هوكنك) فإنهم لم يستطيعوا قطّ التأكّد منها تجريبياً، لأن ما يتنبأ به من إصدار ضوئي عن الثقوب السوداء المجرّية والنجمية أصغر بكثير ممّا تتمكّن الآن من تحسّسه. والأمل الوحيد في ملاحظة إشعاع هوكنك يكمن في أن نجدَ ثقوباً سوداء صغيرة من بقايا الكون الموغل في القدم أو أنها كُوّنت في المسرّعات الجسيمية، وهذا احتمال قد يكون معدوما *[انظر: «الثقوب السوداء الكمومية»، العلوم، العددان 2005/6/5، ص48]* ويُعدّ افتقارنا إلى

(5) gravitional redshift

(6) Hawking effect

(7) ground state

(*) The Ultimate Microscope

(8) string theory [انظر: "The Illusion of Gravity" By Juan Maldacena; Scientific American, November 2005]

تأكيد تجريبي عن مفعول هوكنك أمراً مقلقاً لا سيما إذا تذكّرنا الحقيقة المزعجة عن وجود عيوب في بناء النظرية نفسها ناجمة عن تنبئها بقيمة لا متناهية في الكبر لانزياح الفوتون نحو الأحمر. لنعتبر عملية الإصدار وكيف تبدو عندما ننظر إليها وقد عدنا بالزمان إلى الوراء (أي عندما نتطلّع إلى تطوّرها الزمني بالرجوع عبر الزمن حتى لحظة بدايتها). عندما يقترب الفوتون من الثقب فإنه يصبح أكثر ازرقاقاً، أي يزيد تواتره وينقص طوله الموجي. وكلما رجعنا أكثر إلى الوراء في الزمن اقترب الفوتون أكثر من الأفق، ومن ثم قصر طوله الموجي وعندما يصبح الطول الموجي أصغر بكثير من الثقب الأسود ينضم الجسيم الفوتوني إلى شريكه مكوناً الزوج الافتراضي الذي انقشاه مسبقاً.

يستمرّ الانزياح نحو الأزرق دون توقّف ويمكن بلوغ مسافات قصيرة كيفية[9]. وعندما تصبح المسافة أصغر من 10^{-35} متر، أو ما يُعرف باسم طول پلانك، عندها لايمكن للنظرية النسبية ولا للميكانيك الكمومي أن يتنبأ بسلوك الجسيم، ولا بدّ لنا هنا من استدعاء نظرية كمومية للثقالة. لذلك، يُعدّ أفق الثقب الأسود مجهراً رائعاً بامتياز يسمح للمراقب أن يكون على تماسّ مع ظواهر فيزيائية غير معروفة. وبالنسبة إلى الفيزيائي النظري، تُعتبر إمكانية التضخيم هذه مقلقة، إذ لو كان تنبؤ هوكنك قائما على فيزياء غير معروفة، أفلا يحقّ لنا الشكّ في صلاحيته؟ ألا يمكن لخصائص إشعاع هوكنك، بل حتى وجوده، أن تعتمد على خصائص الزمكان الميكروية، تماما كما تعتمد، مثلاً، السعةُ الحرارية لمادة ما أو سرعةُ الصوت فيها على بنيتها الميكروية وديناميكيتها؟ أم أن هذا الأثر يتحدّد تماماً، كما حاجّ (هوكنك) في بداية الأمر، من خلال الخصائص الماكروية للثقب الأسود، وعلى وجه الخصوص كتلته وسپينه spin؟

لسعات صوتية(**)

بدأت إحدى المحاولات للإجابة عن هذه الأسئلة مع عمل (W. أونره) [من جامعة بريتش كولومبيا]. فقد بيّن (أونره) عام 1981 أن هناك تشابهاً كبيراً بين انتشار الصوت في سائل متحرّك وبين انتشار الضوء في زمكان منحن. واقترح أن هذا التشابه قد يفيد في تخمين أثر الفيزياء الميكروية في إشعاع هوكنك. إضافة إلى ذلك، يمكن لهذا التشابه أن يسمح حتى بإمكانية الملاحظة التجريبية لظاهرة متضمّنة لإشعاع هوكنك.

تتميّز الموجات الصوتية، مثلها في ذلك مثل الموجات الضوئية، بتواترها وطولها الموجي وسرعة انتشارها. وإن مفهوم الموجة الصوتية صالح فقط من أجل أطوال موجة أكبر بكثير من المسافة بين الجزيئات في السائل، إذ تتوقّف الموجات الصوتية عن الوجود عند المسافات الأقصر. إن هذا التقييد هو ما يجعل النموذج التشابهي مهماً

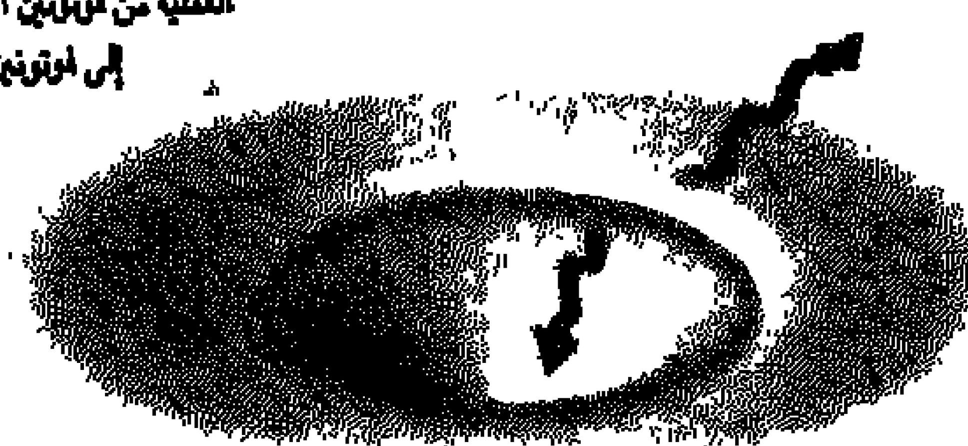
هل كان هوكينغ على خطأ ؟(*)

يتعلّق واحد من أهمّ أسرار الثقوب السوداء وأقلها اعترافا به، بتخمين هوكينغ المشهور حول إمكان إصدار الثقب الأسود لإشعاع. يُحدّد الثقب الأسود بأفق حدث يمكن اعتباره بوّابة في اتّجاه واحد، حيث يمكن للأجسام خارجه أن تسقط إلى داخله، في حين لا يمكن خروج الأجسام من داخله. وقد تساءل هوكينغ عمّا سيحدث لزوج من الجسيمات الافتراضية (التي تظهر وتختفي باستمرار في كل مكان من الفضاء الخالي بسبب الآثار الكمومية) نشأ عند الأفق نفسه

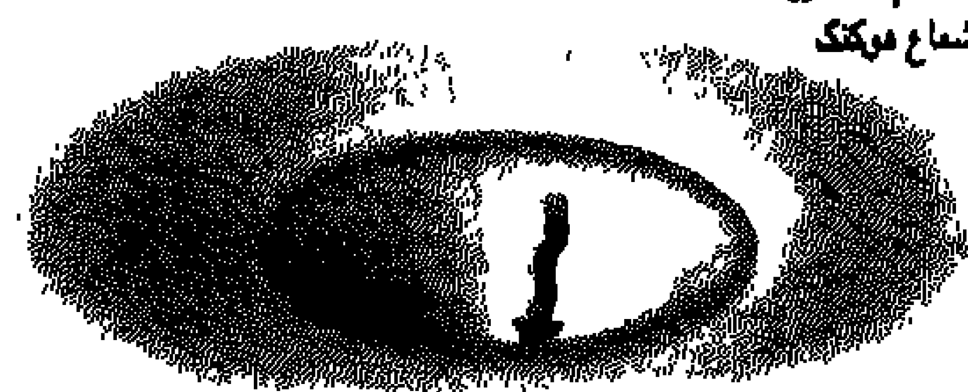
يظهر زوج من الفوتونات الافتراضية عند الأفق بسبب الآثار الكمومية



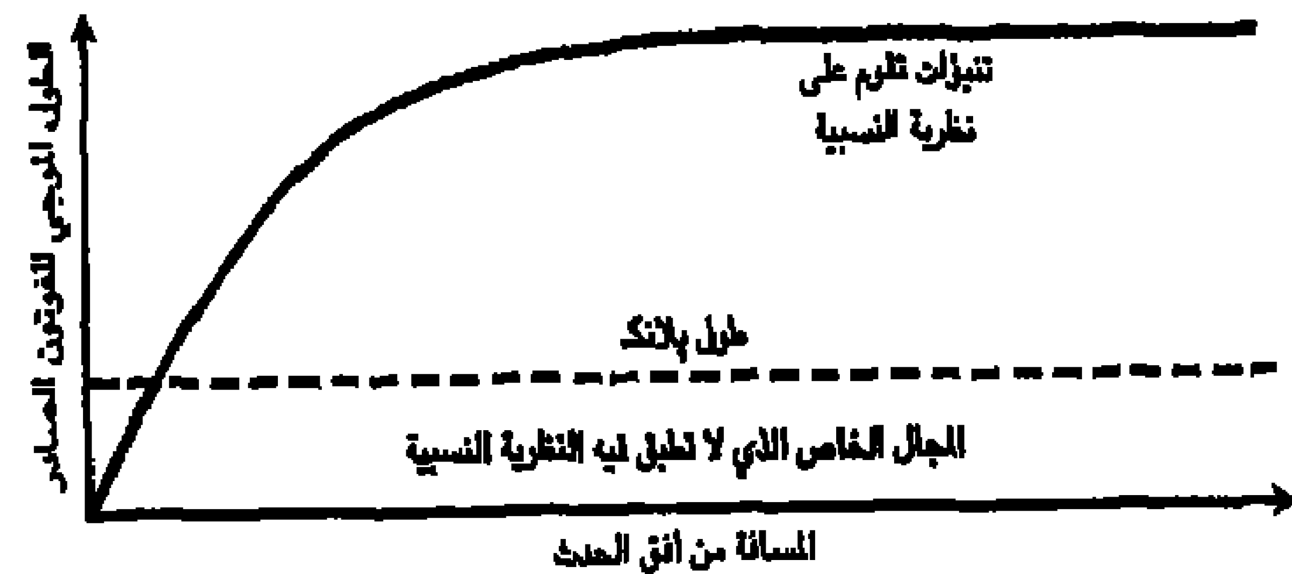
يسقط فوتون واحد للداخل في حين يتسلّق الآخر بعيدا. يتحول الفوتونان عبر هذه العملية من فوتونين افتراضيين إلى فوتونين حقيقيين



تعمل الثقالة على مطّ الفوتون الصادر



تتنبأ النظرية النسبية بأن الفوتون الصادر عن الأفق سوف يمتطّ بمقدار لامتناه في الكبر (*الخط الأحمر في الأسفل*). وبعبارة أخرى، لا بدّ لفوتون تتمّ ملاحظته أن يكون قد نشأ كفوتون افتراضي بطول موجي معدوم تقريبا. ويُعتبر هذا الأمر مسألة مقلقة لأن الآثار الكمومية غير المعروفة تصبح هي المهيمنة عند مسافات أقصر ممّا يُدعى بطول پلانك 10^{-35} متر. وقد دفع هذا اللغز الفيزيائيين إلى تخيُّل نماذج مشابهة للثقوب السوداء قابلة للتحقيق تجريبيا، وذلك من أجل اختبار إمكانية إصدارها لإشعاع، وفهم كيفية نشوئه في حال صدوره.



(*) Was Hawking Wrong?

(9) arbitrary
(**) Sound Bites

لدرجة كبيرة، لأنه يسمح للفيزيائيين بدراسة ما ينجم ماكروياً عن البنية الميكروية. ومع ذلك، ولكي يكون التشابه مفيداً فعلاً، عليه أن يكون صالحاً على المستوى الكمومي كذلك. وبشكل عام، تمنع الاهتزازات الحرارية للجزيئات الموجات الصوتية من أن تسلك سلوك كموم quanta الضوء، ولكن عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق يمكن للصوت أن يسلك سلوك جسيمات كمومية يدعوها الفيزيائيون باسم «الفونونات» تأكيداً لتشابهها مع جسيمات الضوء «الفوتونات». ويلاحظ الفيزيائيون التجريبيون الفونونات مراراً في البلّورات وفي المواد التي تبقى مائعة في درجات الحرارة المنخفضة مثل الهليوم السائل.

يشبه سلوك الفونونات في مائع ساكن أو متحرك بحركة منتظمة سلوكَ الفوتونات في زمكان مستو حيث الثقالة غائبة. وتنتشر مثل هذه الفونونات في خطوط مستقيمة محافظة على قيم طولها الموجي وتواترها وسرعتها. ينتشر الصوت، مثلاً في بركة سباحة ساكنة أو في نهر يجري بهدوء، بشكل مستقيم من منبعه إلى الأذن.

ومع ذلك، تتغيّر سرعة الفونونات في سائل يتحرك بشكل غير منتظم، وقد تمتطّ أطوالها الموجية تماماً كحال الفوتونات في زمكان منحن. ويتشوّه الصوت المنتشر عبر نهر عند ملاقاته وادياً ضيقاً أو عند ملاقاته لما يدور حول فتحة التصريف، فيسلك مساراً منحنياً مثل مسار الضوء المارّ بالقرب من نجم. وفي الحقيقة، يمكن توصيف هذه الظاهرة الصوتية باستخدام الأدوات الرياضياتية الهندسية للنسبية العامة.

ويمكن لجريان مائع أن يؤثّر في الصوت كما يؤثّر الثقب الأسود في الضوء. وهناك طريقة لتكوين مثل هذا الثقب الأسود الصوتي وهي استخدام جهاز يدعوه المهندسون المائيون باسم منفث لافال[10]. وقد صمم هذا المنفث بحيث تصل سرعة المائع في نقطة التّضيّق الأشدّ سرعةَ الصوت في المائع وتتجاوزها من دون أن تكون موجة صدم[11] (وهي التي تكافئ وجود تغيّر مفاجئ في خصائص السائل). تماثل الهندسة الإجمالية للمسألة الصوتية هذه هندسةَ الزمكان لثقب أسود، إذ توافق المنطقةُ فوق الصوتية المنطقةَ داخل الثقب حيث يتمّ ابتلاع الموجات الصوتية المنتشرة بعكس جهة الجريان لتنجرّ مع التيّار مثل انجرار الضوء نحو مركز الثقب الأسود. أمّا المنطقة دون الصوتية فهي توافق المنطقةَ خارج الثقب حيث يمكن للموجات الصوتية أن تنتشر ضد التيّار ولكن على حساب تمطّطها وزيادة طولها، مثلما يحدث للضوء عند الانزياح نحو الأحمر. أما الحدّ الفاصل بين هاتين المنطقتين فيسلك سلوكَ أفق الثقب السود تماماً.



تسلك التموّجات في مجرى مائي سلوكاً مماثلاً إلى حد كبير لسلوك الموجات الضوئية في الزمكان. إن الجريان حول الصخرة ليس منتظما ممّا يسبّب انحناء التموّجات وتغيّر طولها الموجي. ويحدث الأمر نفسه بالنسبة إلى ضوء يمرّ عبر الحقل التثاقلي لكوكب أو نجم. وفي بعض الحالات، يكون الجريان سريعاً جداً لدرجة أن التموّجات لا تستطيع الانتشار باتجاه معاكس لاتجاه الجريان تماماً كالضوء، لا يمكنه الإفلات من الثقب الأسود للانتشار خارجه.

المذهب الذرّي(*)

إذا كان المائع بارداً بشكل كاف فيبقى التشابه قائماً حتى على المستوى الكمومي. وقد قدّم (أونره) حججاً على أن الأفق الصوتي يصدر فونونات حرارية مماثلة لإشعاع هوكنك. تسبّب التراوحات والتموّجات الكمومية قرب الأفق ظهور أزواج من الفونونات، ويُجرف أحد الشريكين في زوج ما إلى المنطقة فوق الصوتية، ولن يستطيع الخروج منها أبداً، بينما يكمل الشريك الآخر اهتزازاته وينتشر ضدّ التيّار متمطّطاً أثناء ذلك بفعل تدفّق المائع. ولو وضعنا ميكرفوناً في أعلى النهر لالتقط هسهسة ضعيفة، تأتي طاقتها الصوتية من الطاقة الحركية للمائع المتدفّق.

تعتمد النغمة المهيمنة للضجة التي نسمعها على هندسة المسألة؛ وتكون القيمة النموذجية للطول الموجي للفونونات الملاحظة من مرتبة المسافة التي تتغيّر خلالها سرعة المائع بشكل محسوس. تفوق هذه المسافة إلى حد كبير المسافةَ الفاصلةَ بين الجزيئات ممّا سمح لـ(أونره) في عمله الأصلي اعتبارَ المائع كلّه أملس ومتّصلاً. ومع ذلك، تتكوّن الفونونات قرب الأفق بأطوال موجية قصيرة جداً لدرجة أنها لا بدّ أن تتحسّس الطبيعة الحبيبيةَ للمائع. هل يؤثّر هذا الاعتبار في النتيجة النهائية؟ هل يمكن لمائع حقيقي إصدار فونونات على طريقة هوكنك، أم أن توقّع (أونره) نتاج صنعي ناجم عن اعتبارنا المثالي لمائع متّصل؟ فلو أمكن الإجابة عن هذه الأسئلة من أجل الثقوب السوداء الصوتية لساعد التشابه على توجيه الفيزيائيين في حالة الثقوب السوداء التثاقلية[12].

---

[10] Laval nozzle

[11] shock wave

(*) Atomism

[12] gravitational

الضوء مقابل الصوت(*)					
نوع الموجة	الوصف المعهود	الوصف الكمومي	السرعة	سبب انحناء مسار الموجة	أين تتوقف صحة الوصف؟
ضوء	حقول كهربائية ومغنطيسية مهتزّة	فوتون موجة كهرمغنطيسية	300 000 كم/ثا	انحناء (تقوس) الزمكان الناجم عن وجود المادة والطاقة	طول پلانك؟ (10^{-35} متر)
صوت	حركة جماعية للجزيئات	فونون موجة صوتية	1500م/ثا (في الماء السائل)	اختلافات في سرعة المائع واتّجاه حركته	المسافة الفاصلة بين الجزيئات (10^{-10} متر من أجل الماء)

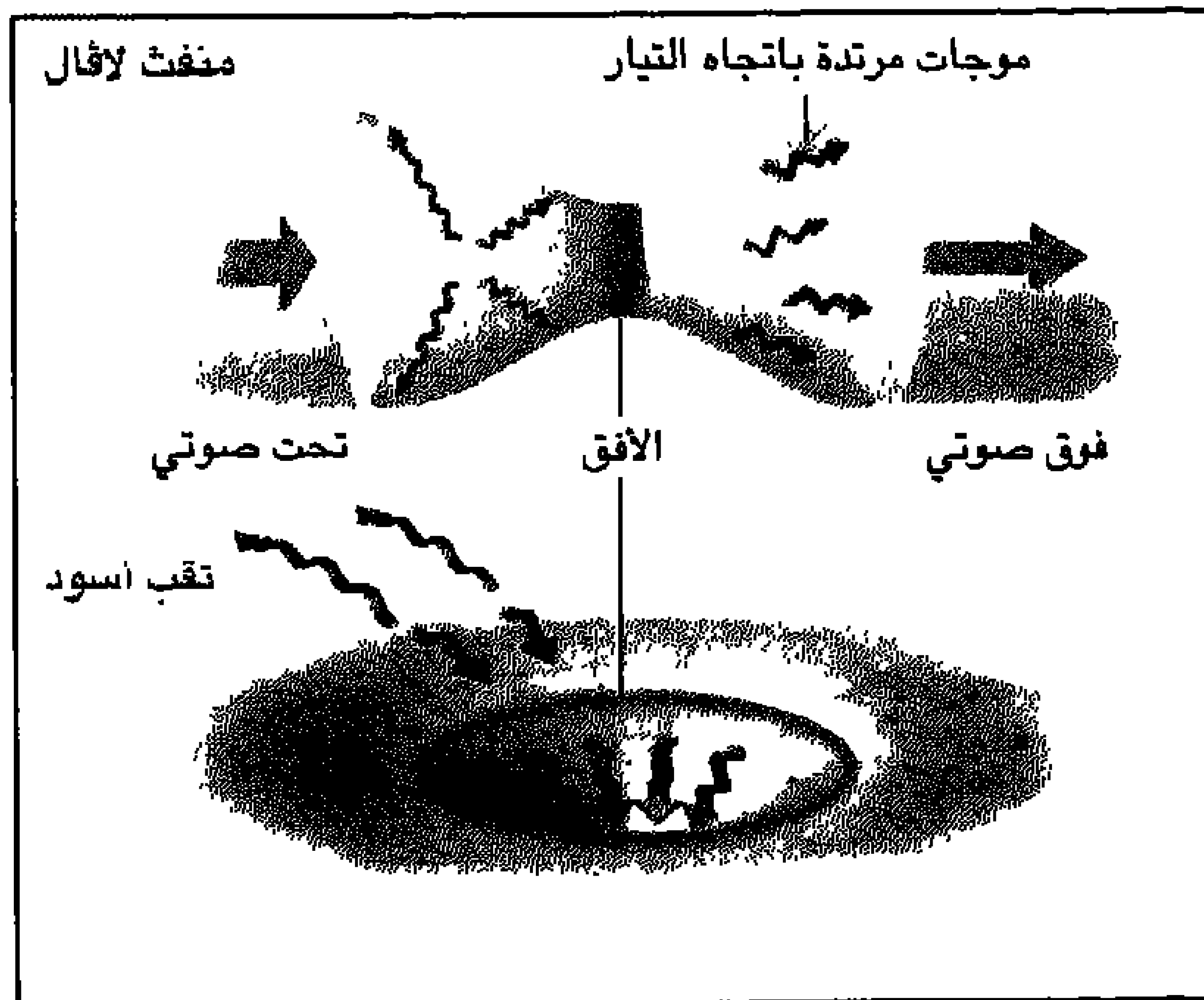
اقترح الفيزيائيون، إضافة إلى مثال تدفّق مائع بسرعة قريبة من سرعة الصوت، عدداً من النماذج المتشابهة للثقوب السوداء. ويتضمّن بعض هذه النماذج، عوضاً عن الموجات الصوتية، اهتزازات على سطح مائع أو على طول الحدّ الفاصل بين طبقات من الهليوم فائق الميوعة والذي يتميّز بدرجة حرارة منخفضة أفقدته أيّ مقاومة احتكاكية للحركة. وحديثاً اقترح (أونره) و(R. شوتزهولد) [من الجامعة التقنية في درسدن] دراسة موجات كهرمغنطيسية تمرّ عبر أنبوب إلكتروني ضئيل ومهندس بدقة. مبدئياً، من الممكن للفيزيائيين تكوين حادثة أفق، وذلك عبر إرسال ضوء ليزر على طول الأنبوب ماسحاً إيّاه كلّيةً من أجل تغيير السرعة الموضعية للموجة. وتكمن فكرة أخرى في نمذجة التوسع المتسارع للكون والذي يولّد إشعاعاً على طريقة هوكنك، حيث يمكن مثلاً، لمتكثّف «بوز — أينشتاين»[13]، وهو غاز بارد لدرجة فقدانِ الذرّات لهويّتها كجسيمات منفردة، أن يؤثّر في الصوت مثل تأثير الكون الآخذ بالاتّساع في الضوء، إمّا عبر تطايره باتجاهات متباعدة، أو عبر التحكّم فيه باستخدام حقل مغنطيسي لإعطاء الأثر نفسه. لم يصنع التجريبيون إلى الآن أياً من هذه الأجهزة في المختبرات. إن العمليات والإجراءات المتضمّنة لتحقيق ذلك معقّدة، ويوجد في ظواهر فيزياء درجة الحرارة المنخفضة ما يكفي لشغل بال التجريبيين. من أجل ذلك، يحاول النظريون الآن في معالجتهم هذه المسألة دراسةَ إمكانية تحقيق تقدّم رياضياتي.

يُعدّ فهم كيفية تأثير البنية الجزيئية للمائع في الفونونات بالغ التعقيد. ولحسن الحظ وبعد عشر سنوات من اقتراح (أونره) لنموذجه المشابه الصوتي، أتى أحدنا (جاكوبسون) بفكرة مبسطة مفيدة جداً. يمكن تضمين مجمل التفاصيل الأساسية للبنية الجزيئية في الطريقة التي يعتمد بها تواتر الموجة الصوتية على طولها الموجي. وعلاقة الاعتماد هذه تسمى علاقة التشتّت[14]، وهي تحدّد سرعة انتشار الموجة. وهذه السرعة ثابتة من أجل أطوال موجية كبيرة، بينما يمكن لها أن تتغيّر مع طول الموجة عندما يصبح هذا الأخير صغيراً من مرتبة المسافة الفاصلة بين الجزيئات.

يمكن ظهور ثلاثة أنماط سلوكية مختلفة لعلاقات التشتّت. لا يتضمّن النمط I أيّ تشتّت، أي إن الموجات ذات الأطوال الموجية القصيرة تسلك سلوكَ الموجات الطويلة نفسه. أمّا في النمط II فإن سرعة الانتشار تنقص عندما يصغر الطول الموجي، في حين تزداد هذه السرعة في النمط III بنقصان الطول الموجي. يصف النمط I الفوتونات في النظرية النسبية، في حين يصف النمط II الفونونات في الهليوم الفائق الميوعة مثلاً، أمّا النمط III فيصف الفونونات في متكثّفات «بوز — أينشتاين» المخففة. يُعتبر هذا التصنيف إلى ثلاثة أنماط مبدأ تنظيميا يسمح بمعرفة كيفية تأثير البنية الجزيئية في الصوت ماكرويا. ومنذ بداية عام 1995، قام (أونره) وباحثون آخرون بدراسة مفعول هوكنك بوجود علاقة تشتّت من النمط II أو النمط III.

نموذج مشابه لثقب أسود(*)

يمثّل منفث لافال Laval nozzle، الذي يوجد في مؤخرة الصواريخ، نموذجاً جاهزاً مشابهاً لثقب أسود. يدخل المائع بسرعة تحت صوتية subsonic، ويجبره العائق التضيقي على التسارع ليبلغ سرعة الصوت بحيث يخرج هذا المائع بسرعة فوق صوتية. ويمكن للموجات الصوتية في المنطقة تحت الصوتية أن تتحرك ضد التيّار. في حين لا تستطيع ذلك في المنطقة فوق الصوتية. فالتضيق إذاً يسلك سلوك أفقِ ثقب أسود، ومن ثم يمكن للصوت الولوج إلى المنطقة فوق الصوتية ولكنه لا يستطيع الخروج منها. وتولّد التراوحات والتموّجات الكمومية عند التضيق مشابهات صوتية لإشعاع هوكنك.



(*) Black Hole Analouge

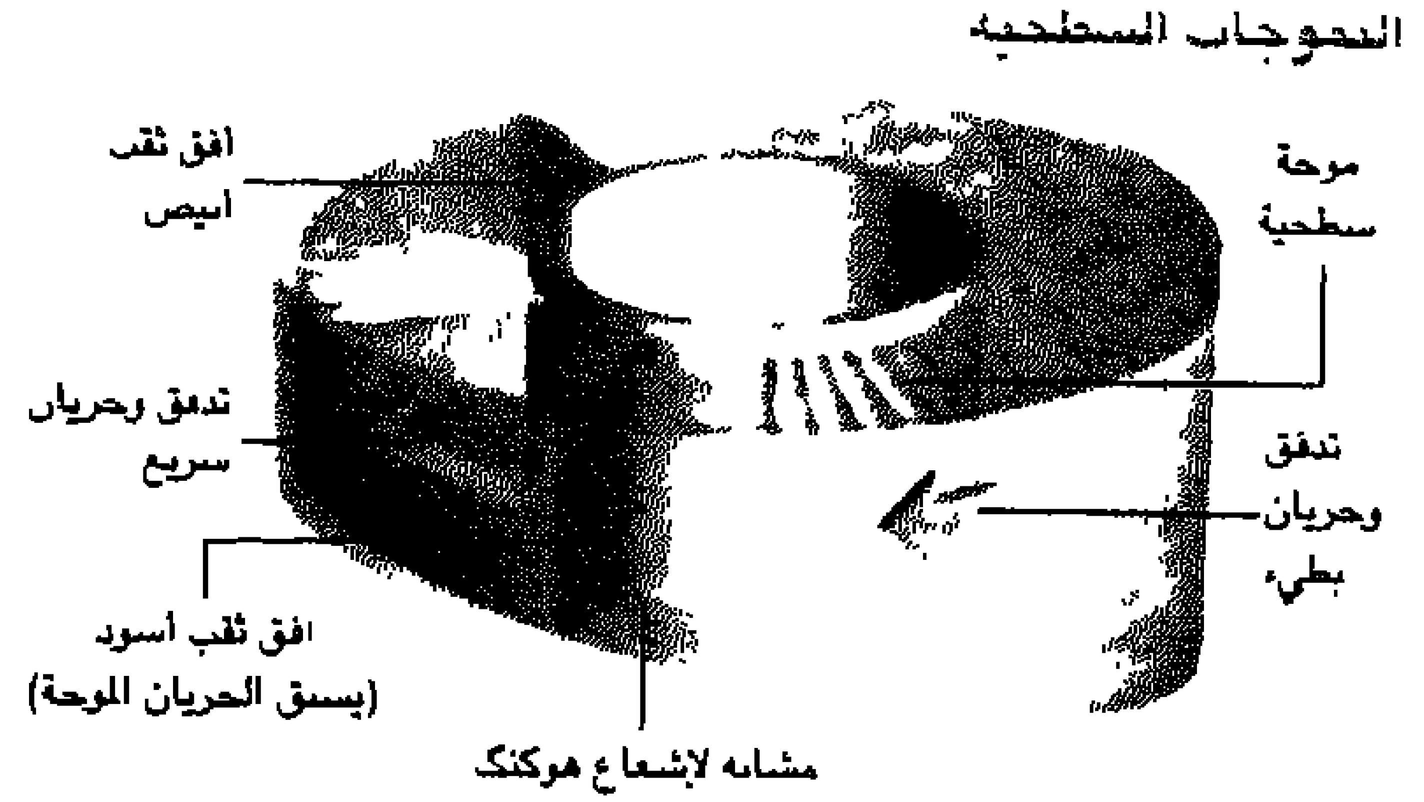
(13) [انظر: « كثافة بوز — أينشتاين» العلوم، العدد 11 (2000)، صفحة 54]

(14) dispersion relation

نماذج أخرى للثقوب السوداء(*)

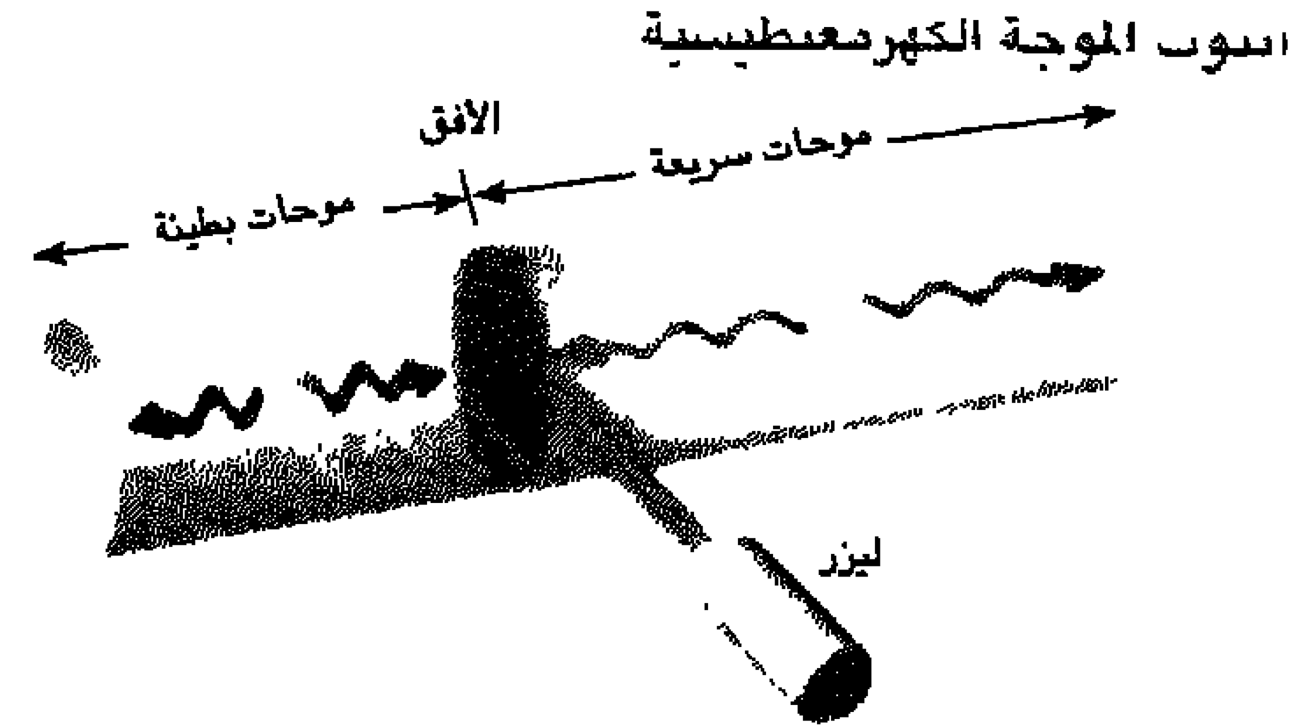
يمكن لأجهزة أخرى غير منفث لافال إظهار الخصائص الأساسية لأفق حدث ثقب أسود والمتمثّلة بإمكانية حركة الموجات في طريق دون آخر وكلٌّ من هذه الأجهزة يوفر استبصارات حول الثقوب السوداء، وعليها جميعا توليد ما يشابه إشعاع هوكنك

الموجات السطحية



تتضمّن هذه التجربة، عوضا عن الموجات الصوتية، موجات سطحية في مائع يجري حول قناة دائرية. وعندما تصبح القناة أقل عمقا، فإن الجريان يتسارع ويمكن له في بعض النقاط أن يسبق الموجات السطحية مانعا إياها من الحركة ضد التيار - مكونا بذلك ما يشبه أفق ثقب أسود. يُكمل هذه الدارة ما يُعرف باسم أفق الثقب الأبيض، وهو منظومة تسمح للتدفّق المادي بالخروج منها ولكن لا تسمح له بدخولها. ومن أجل ملاحظة الإشعاع على طريقة هوكنك لا بدّ من استخدام مائع تمّ تبريده لدرجة كبيرة مثل الهليوم 4

انبوب الموجة الكهرمغنطيسية



تدرس هذه التجربة الموجات الميكروية المارة عبر عصا على شكل أنبوب بُنيت بحيث يمكن تعديل سرعة انتشار الموجة بوساطة حزمة ليزرية. ومن خلال مسح هذه الحزمة لكامل طول العصا، يمكن تكوين أفق متحرّك يقسم العصا إلى منطقتين موافقتين لموجات سريعة وأخرى بطيئة. ولا يمكن للموجات في المنطقة البطيئة بلوغ المنطقة السريعة، في حين يمكن للموجات في المنطقة السريعة العبور إلى المنطقة البطيئة. وقد يكون الإشعاع على طريقة هوكنك في هذه الحالة أقوى وأسهل رصدا منه في النماذج المشابهة المائعة

سحابة غازية



يستطيع المحور الطويل لسحابة غازية على شكل سيگار وآخذة في التضخّم أن تحاكيَ كونا أحادي الأبعاد يزداد اتّساعا بشكل متسارع. ويسلك مثل هذا الكون سلوك ثقب أسود معكوس (أي يمتص الأشياء من الداخل ويقذفها إلى الخارج): فالموجات التي تقع خارج الأفق يتم ابتلاعها بسرعة كبيرة ولا تستطيع دخول المنطقة الداخلية. والإشعاع على طريقة هوكنك ينتشر نحو الداخل. وفي العادة، قد يكون الغاز متكثّف «بوز-اينشتاين»، وهو نوع من الغازات الفائقة البرودة ذو خواص كمومية تجعل التشابه مع مفعول هوكنك ممكنا.

لنرَ كيف تبدو الفونونات، على طريقة هوكنك، وذلك عندما ننظر إليها كما كانت في ماضي الزمن. في البداية، لا يؤثّر نمط علاقة التشتّت في سلوك الفونونات، فتسبح هذه باتجاه التيّار نحو الأفق وطولها الموجي يتناقص أثناء ذلك. ويصبح نمط علاقة التشتّت مهماً عندما يقترب الطول الموجي من مرتبة المسافة الفاصلة بين الجزيئات. في النمط II، تبدأ الفونونات في التباطؤ ثم تعكس جهة سيرها وتبدأ بالجريان ضدّ التيار، أمّا في النمط III، فإنها تتسارع لتبلغ سرعة أكبر من سرعة انتشار الصوت الموافقة للأطوال الموجية الكبيرة ثمّ تجتاز الأفق.

عودة إلى الأثير(**)

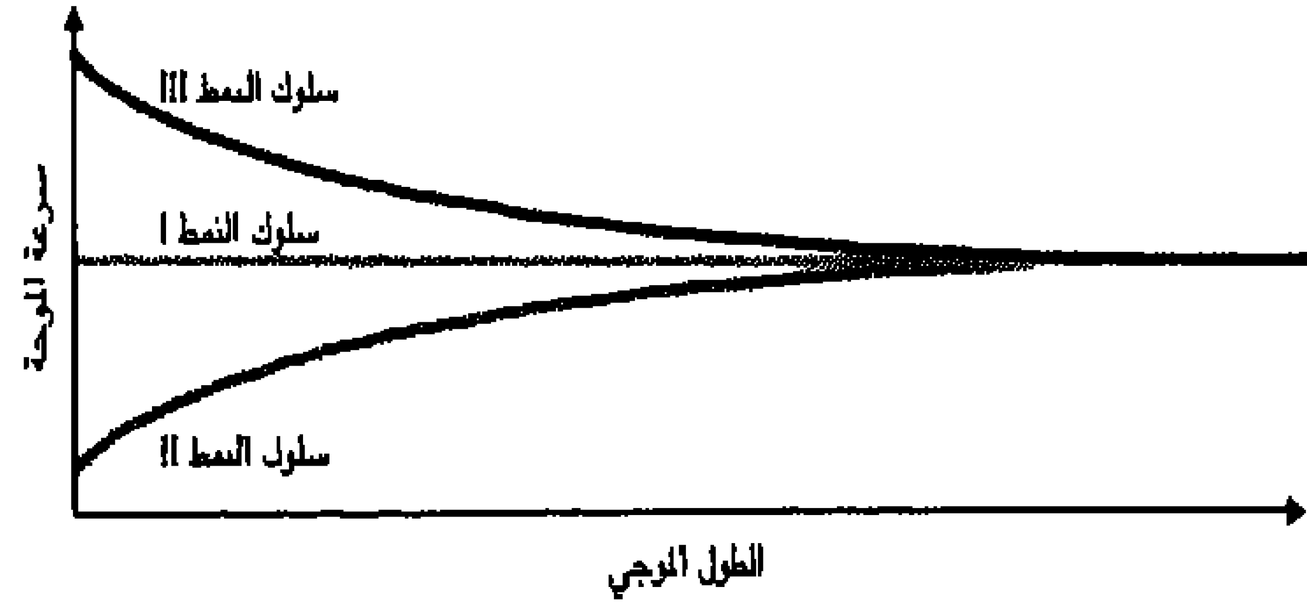
إن مشابهاً حقيقياً لمفعول (هوكنك) يجب أن يحقّق شرطاً مهماً، وهو ضرورة أن تبدأ الأزواج الافتراضية للفونونات حياتها في الحالة الأساسية، كما هي الحال بالنسبة إلى أزواج الفوتونات الافتراضية حول الثقب الأسود.ويمكن تحقيق مثل هذا الشرط بسهولة في مائع حقيقي. وطالما كان تغيُّر تدفّقُ المائع الماكروي بطيئاً في الزمان وفي المكان (مقارنة بمعدل تواتر الأحداث على المستوى الجزيئي)، فإن الحالة الجزيئية للمائع تتعدّل باستمرار من أجل تخفيض طاقة المنظومة ككل. وليس مهماً هنا طبيعة جزيئات المائع المكونة له.

(*) Other Black Hole Modeles

(**) Ether Redux

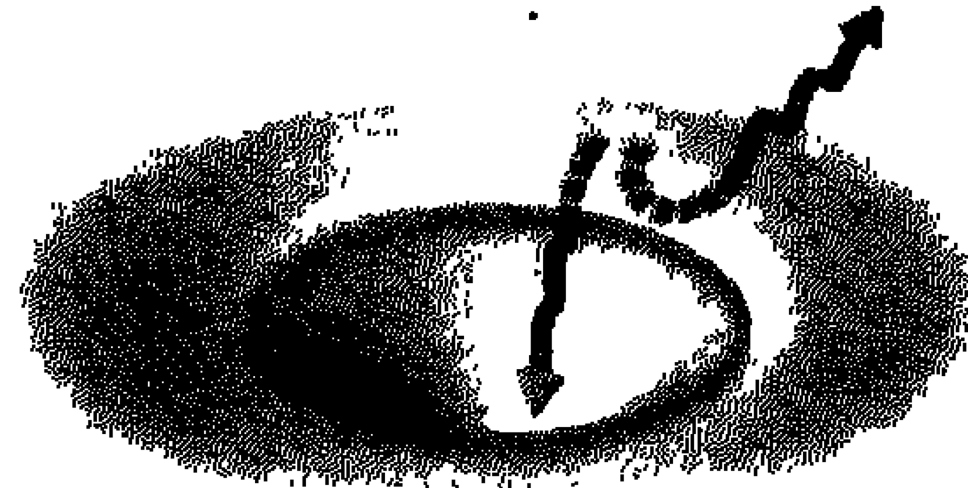
لقد كان هوكينغ على حق، ولكن . . .(*)

توحي لنا النماذج المائعة المشابهة للثقوب السوداء بطريقة لتصحيح الخلل في تحليل هوكينغ في مائع مثالي، تكون سرعة الصوت ثابتة مهما يكن الطول الموجي (وهذا يسمى سلوك النمط I) وفي مائع حقيقي، تتناقص سرعة انتشار الصوت (النمط II) أو تتزايد (النمط III) مع تناقص الطول الموجي واقترابه من قيمة المسافة الفاصلة بين الجزيئات



يرتكز تحليل هوكينغ على النظرية النسبية المعهودة، حيث يسير الضوء بسرعة ثابتة (سلوك النمط I) وإذا تغيرت سرعة الضوء مع تغيُّر الطول الموجي، كما في النماذج المائعة المشابهة، فقد تتغير مسارات فوتونات هوكينغ

من أجل النمط II، تُخلق الفوتونات خارج الأفق وتسقط للداخل واحدٌ منها سيعاني تغيّرا في سرعته ثم يعكس اتّجاهه وينطلق خارجا



من أجل النمط III، تنشأ الفوتونات داخل الأفق يتسارع أحدها متجاوزا سرعة الضوء الاعتيادية ممّا يسمح له بالإفلات.



لما كانت الفوتونات لا تنشأ عند الأفق بالضبط فإنها لن تتعرض لانزياح لانهائي نحو الأحمر. ولهذا التصحيح لتحليل هوكينغ ثمن وهو وجوب إدخال تعديلات على النظرية النسبية خلافا لفرضيات «أينشتاين»، يجب على الزمكان أن يسلك سلوك مائع مكوّن من «جزيئات» من طبيعة غير معروفة

يمكن البرهان على أنه عند تحقيق هذا الشرط فإن المائع سيصدر إشعاعاً على طريقة هوكنك بصرف النظر عن أيّ نوع من علاقات التشتّت الثلاث التي يخضع لها المائع. ولن يكون هنا للتفاصيل الميكروية للمائع أيّ أثر في هذه النتيجة، إذ إن أهميتها تزول تماماً عند انطلاق الفوتونات بعيداً عن الأفق. إضافة إلى ذلك، فإن الأطوال الموجية الكيفية القصيرة التي يستدعيها تحليل هوكنك في عمله الأصلي، لا تظهر عندما تكون علاقة التشتّت من أحد النمطين II أو III. وبدلاً من ذلك، فإن الأطوار الموجية تتناقص إلى حدودها الدنيا عند المسافة الفاصلة بين الجزيئات. وليس الانزياح نحو الحمر اللامتناهي إلاّ تجسيداً خاطئاً للفرضية غير الفيزيائية عن الذرات المتناهية في الصغر.

وعند تطبيقه على ثقوب سوداء حقيقية، فإن المشابه المائع يضفي ثقة بأن نتيجة (هوكينغ) صحيحة على الرغم من الفرضيات التبسيطية التي أخذ بها. إضافة إلى ذلك، يوحي هذا التشابه لبعض الباحثين بأنه يمكن تجنّب الانزياح اللامتناهي نحو الأحمر عند أفق ثقب أسود تثقالي[15] وذلك بتشتيت أطوال موجية قصيرة للضوء، مثلما يحدث في حالة المائع. إلا أن هناك شركاً مخبّأ هنا. فالنظرية النسبية تؤكد بصورة قاطعة أن الضوء لا يعاني أيّ تشتّت في الفراغ. والطول الموجي للفوتون يبدو مختلفاً بالنسبة إلى مراقبين مختلفين؛ فهو لا متناه في الكبر عندما يُرى من جملة مرجعية متحركة بسرعة قريبة جداً من سرعة الضوء. لذلك، لا يمكن لقوانين الفيزياء أن تحدّد لنا حدّاً ثابتاً للطول الموجي القصير، الذي يتغيّر عنده نوعُ علاقة التشتّت من النمط I إلى النمط II أو III. فلكل مراقب قيمة خاصة به لذلك الحدّ.

إذاً يواجه الفيزيائيون معضلة، فإمّا أن يحافظوا على ما حتّم عليه (أينشتاين) وهو عدم وجود جملة مرجعية مميّزة، ويقبلوا في الوقت نفسه بحقيقة الانزياح اللامتناهي نحو الأحمر، أو أن يقترحوا أن الفوتونات لا تعاني انزياحاً لامتناهياً نحو الأحمر، وعليهم في هذه الحالة أن يقبلوا بوجود جملة مرجعية للمراقبة مميّزة. هل ستنتهك جملة مرجعية كهذه مبدأ النسبية؟ لا أحد يعرف إلى الآن الإجابة عن هذا السؤال. قد يكون من الممكن أن نظر إلى هذا المرجع المفضل كأثر محلي يظهر فقط قرب آفاق الثقوب السوداء، وفي هذه الحالة تبقى النظرية النسبية صالحة بشكل عام. ومن ناحية أخرى، قد يوجد هذا المرجع المفضل في كلّ مكان وليس فقط قرب الثقوب السوداء، وفي هذه الحالة ستكون النظرية النسبية تقريباً لنظرية أعمق عن الطبيعة. لم يلاحظ التجريبيون إلى الآن مثل هذا المرجع المفضل، ولكن هذه النتيجة السلبية قد تكون ببساطة ناجمةً عن افتقار التجارب للدقة الكافية.

لقد خامر الفيزيائيون منذ زمن طويل الشعورُ بأن التوفيق بين النسبية العامة والميكانيك الكمومي سيُدخل حداً خاصاً بالمسافات الصغيرة، وقد يكون هذا الحد ذا صلة بمقياس بلانك. ويدعم التشابه الصوتي هذا الشعور بأن للزمكان بنية حبيبية نوعاً ما، لكي يلطّفَ ذلك من أثر الانزياح اللامتناهي نحو الأحمر المريب.

---

(15) أو جملة مرجعية Reference frame.

(*) Hawking Was Right, But ...

إذا كان الأمر كذلك لكان التشابه بين انتشار الصوت وانتشار الضوء أفضل حتى ممّا ظنّ به أولاً (أونره). وقد يقودنا التوحيد بين النسبية العامة والميكانيك الكمومي إلى تخلّينا عن ذلك التصوّر المثالي لمكانٍ وزمانٍ مستمرّين ومتّصلين، كما يقودنا إلى اكتشاف «ذرّات» الزمكان. ومن الممكن أن تكون أفكار مشابهة قد راودت (آينشتاين) عند كتابته رسالة لصديقه العزيز (M. بيسو) عام 1954، وذلك قبل وفاته بسنة، إذ قال: «أعتبر أنه من الممكن تماماً استحالة بناء الفيزياء على أساس مفهوم الحقل field، أي على أساس بنية متّصلة.» ولكن هذا الأمر سيقتلع الأسس الراسخة التي تقوم عليها فيزياء اليوم، وليس لدى العلماء في الوقت الحاضر نظرية واضحة يمكن ترشيحها لتكون بديلاً. وفي الواقع، يضيف (آينشتاين): «وعندها لن يبقى شيء في الهواء من قلعة إسهاماتي النظرية، بما في ذلك نظرية التثاقل، والأمر سيّان بالنسبة إلى ما تبقّى من الفيزياء الحديثة.» لكن لا تزال القلعة صامدة بعد مرور خمسين سنة على كتابة هذه الرسالة، مع أن مستقبلها ليس واضحاً. ومن الممكن أن تكون الثقوب السوداء أو مشابهاتها الصوتية قد بدأت بإنارة الطريق وسبر غوره.

المؤلفان

Theodore A. Jacobson – Renaud Parentani

يدرسان ألغازَ الثقالة الكمومية ونتائجَها القابلةَ للملاحظة في فيزياء الثقوب السوداء والكوسمولوجيا (علم الكون). جاكوبسون هو أستاذ الفيزياء بجامعة ماريلاند وتتركّز أبحاثه الحديثة على ترموديناميك الثقوب السوداء ودراسة إمكانية كون الزمكان ذا بنية منفصلة على المستوى الميكروي، وفيما إذا كان من المستطاع اكتشاف هذه البنية الدقيقة ماكرويا. أمّا پارنتاني فهو أستاذ الفيزياء بجامعة پاريس الجنوبية في أورسي، ويعمل في مختبر الفيزياء النظرية التابع للمركز الوطني للأبحاث العلمية في فرنسا (CNRS). وتتركّز أبحاثه على دور التراوحات والتموّجات الكمومية في فيزياء الثقوب السوداء والكوسمولوجيا.

وهذه المقالة هي ترجمة وتحديث لمقالة كتبها (پارنتاني) ونشرت في عدد الشهر 5 (2005) في مجلة Pour la Scinece، النسخة الفرنسية لمجلة ساينتفيك أمريكان، وهي إحدى أخوات العلوم.

مراجع للاستزادة

Trans-Planckian Redshifts and the Substance of the Space-Time River. Ted Jacobson in Progress of Theoretical Physics Supplement، No. 136، pages 1-17; 1999. Available {free registration}' at http:// ptp.ipap.jp/cgi-bin/getarticle? Magazine = ptps& volume = 136 & number=&page=1-17

What Did We learn from Studying Acoustic Black Holes? Renaud Parentani in International Journal of Modern Physics A، Vol. 17، No. 20، Pages 2721-2726; August 10، 2002. Preprint available at http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204079

Black-Hole Physics in an Electromagnetic Waveguide. Steven K. Blau in Physics Today، Vol. 58، No. 8، Pages 19-20; August 2005.

For papers presented at the workshop on "Analog Models of General Relativity،"see www.Physics.wustl.edu/~visser/Analog/



هل أتت الحياة من عالم آخر(*)

تظهر الأبحاث الحديثة أن ثمة أحياء ميكروية[1] ربما بقيت حية بعد رحلة من المريخ إلى الأرض.

(D. وورمفليش) ـ (B. وايس)

طوال حقبة طويلة من الزمن، ظل معظم العلماء يتقبّلون بالفرضية القائلة بأن الحياة على الأرض هي ظاهرة نشأت على الكرة الأرضية، ووفقاً لهذه الفرضية السائدة، فقد نشأت أقدم الخلايا الحية نتيجة تطور كيميائي جرى على كوكبنا قبل بلايين السنين في سياق عملية تسمى التخليق الحيوي[2]. أما الاحتمال البديل ـ وهو أن الخلايا الحية، أو أسلافها، جاءت من الفضاء ـ فيُعَدُّ مِنْ قِبَلِ كثير من الناس خيالاً علمياً. بيد أن التطورات التي حدثت في العقد الماضي وفّرت مصداقية جديدة للفكرة القائلة بأن المحيط الحيوي[3] للأرض ربما نشأ عن بزرة خارج الأرض.

لقد عرف علماء الكواكب أن المنظومة الشمسية في باكورة تاريخها ربما كانت تتضمن كثيراً من العوالم التي تحتوي ماءً سائلاً، وهو المكوِّن الأساسي للحياة كما نعرفها. هذا وثمة بياناتٌ حديثةٌ وفّرتها مركَبَاتُ استكشاف المريخ الجوالة[4]، التي أطلقتها الوكالة ناسا، تؤيد شكوكاً سابقة تذهب إلى أن الماء كان يجري، بطريقة متقطعة على الأقل، على الكوكب الأحمر في وقت سابق من تاريخه. ولن يكون من غير المعقول افتراض وجود حياة على المريخ قبل زمن بعيد، واحتمال استمرارها هناك. وربما نشأت حياة على يوروبا[5] الذي يشغل المرتبة الرابعة في الكبر بين أقمار المريخ، والذي يبدو أنه يحوي ماءً سائلاً تحت سطحه الجليدي. ثم إن تيتان، أكبر أقمار زحل، غني بالمركّبات العضوية؛ ولما كانت تسود هذا القمرَ درجاتُ حرارة منخفضة جداً، فمن المستغرب كثيراً العثور على أشكال حيّة هناك، لكنْ لا يمكن نَفْيُ وجودها. وقد تجد الحياةُ موطئ قدم لها على كوكب الزّهرة الحار. فمع وجود احتمال بأن تحوّل حرارةُ سطح المرّيخ العالية جداً والضغطُ المرتفعُ جداً الذي يرزح هذا السطح تحته، دون صلاحيته للحياة، من الممكن تصوّرُ دَعم هذا الكوكب لحياة ميكروبية في أعالي غلافه الجوي. والأكثر احتمالاً هو أنّ أحوال الحرارة والضغط على سطح الزّهرة لم تكنْ قاسيةً جداً دائماً، وأنها كانت، في وقت من الأوقات، شبيهة جداً بتلك التي كانت سائدة على سطح أرضنا في المراحل المبكرة من تاريخها.

إلى ذلك، لا تمثل الامتدادات الواسعة للفضاء بين الكواكب حواجز منيعة كما كان يُظن سابقاً. ففي السنوات العشرين الماضية، توصّل العلماء إلى أنّ أكثر من 30 نيزكاً وُجدت على أرضنا جاءت من قشرة المريخ، وقد استندوا في نتيجتهم هذه إلى تركيب الغازات المحصورة داخل بعض تلك الصخور النيزكية. وفي الوقت نفسه، اكتشف البيولوجيون كائنات حية organisms ساعدتها قوة تحملها على البقاء حية بعد قطعها رحلة قصيرة على الأقل وهي داخل هذه النيازك. ومع أنه لا يستطيع أحد الجزم بأن هذه الكائنات الحية الخاصة قامت فعلاً بهذه الرحلة، فإنها تصلح لتقدم دليلاً على المبدأ. وليس من غير المعقول أن تكون الحياة نشأت على المريخ ثم

نظرة إجمالية / حياة أتت من الفضاء(*)

- تذهب فرضية البانسبيرميا إلى أن الخلايا الحية، أو أسلافها، ربما نشأت على كوكب أو قمر آخر قبل بلايين السنين، ثم قامت برحلة إلى الأرض على متن نيزك.
- لقد انسلخ جزء صغير من الصخور عن المريخ نتيجة صدم الكوكب بنيازك أو مذنبات، ومن المحتمل أن تكون هذه الصخور قد وصلت إلى الأرض بعد مرور بضع سنوات فقط على حادثة الصدم.
- يخطط الباحثون لتقييم احتمال صحة فرضية البانسبيرميا، وذلك بدراسة إمكان بقاء الأحياء الميكروية على قيد الحياة بعد قيامها برحلة بين الكواكب.

(*) Overview/Life from Space.

(*) DID LIFE COME FROM ANOTHER WORLD?

(1) microorganisms.

(2) abiogenesis.

(3) biosphere.

(4) Mars Exploration Rovers.

(5) Europa.

قطار سريع بين الكواكب(*)



انتقلت إلى الأرض، أو أن يكون العكس قد حدث. ويجري العلماء حالياً دراسات جادة الانتقال مواد بيولوجية بين الكواكب، كي يتوصلوا إلى إدراك أفضل لاحتمال حدوث مثل هذا الانتقال في أي وقت مضى. وقد تسلّط جهودُهم هذه الضوءَ على عدد من أكثر التساؤلات العلمية الحديثة إلحاحاً مثل: أين نشأت الحياة، وكيف؟ هل وجود أشكال من الحياة، يختلف بعضها عن بعض جذرياً أمر ممكن؟ ما مدى شيوع الحياة في الكون؟

من الفلسفة إلى المختبر(**)

كان قدماء الفلاسفة يرون أنّ خلق الحياة من مادة غير حيّة يبدو أمراً أقرب إلى السحر، وفضّل بعضهم فكرة وصول أنماط حيّة موجودة في مكان آخر إلى الأرض. فقد وضع (أناكساكوراس)(6) [الفيلسوف اليوناني، الذي عاش قبل 2500 سنة] فرضية سماها باليونانية «بانسبيرميا»(7) (أي «جميع البزور») مفادها أن الحياة كلها، بل جميع الأشياء، خُلِقَتْ من مجموعة من بزور بالغة الصغر تغشى الكونَ. وفي الأزمنة الحديثة، انبرى كثير من العلماء الطليعيين ـــ منهم الفيزيائي البريطاني (L. كلـفن) والكيميائي السويدي (S. أرّينيوس) و(F. كريك) [أحد المشاركين في اكتشاف بنية الدنا DNA] لتقديم تصورات متنوعة للبانسبيرميا. ومن المؤكد أنه وُجِد أيضاً لهذه الفكرة أنصار أقل شهرة، لكن ذلك لا يقلل من حقيقة كون البانسبيرميا فرضية غاية في الأهمية، إذ إنها ظاهرة محتملة، علينا ألاّ نتجاهلها عند التعرض لانتشار الحياة ونشوئها وتطورها في الكون، ولكيفية نشوء الحياة على الأرض بوجه خاص.

وتعالج فرضية البانسبيرميا، في صيغتها الحديثة، كيفية وصول المادة البيولوجية إلى كوكبنا، لكنها لا تتحدث عن كيفية نشوء الحياة

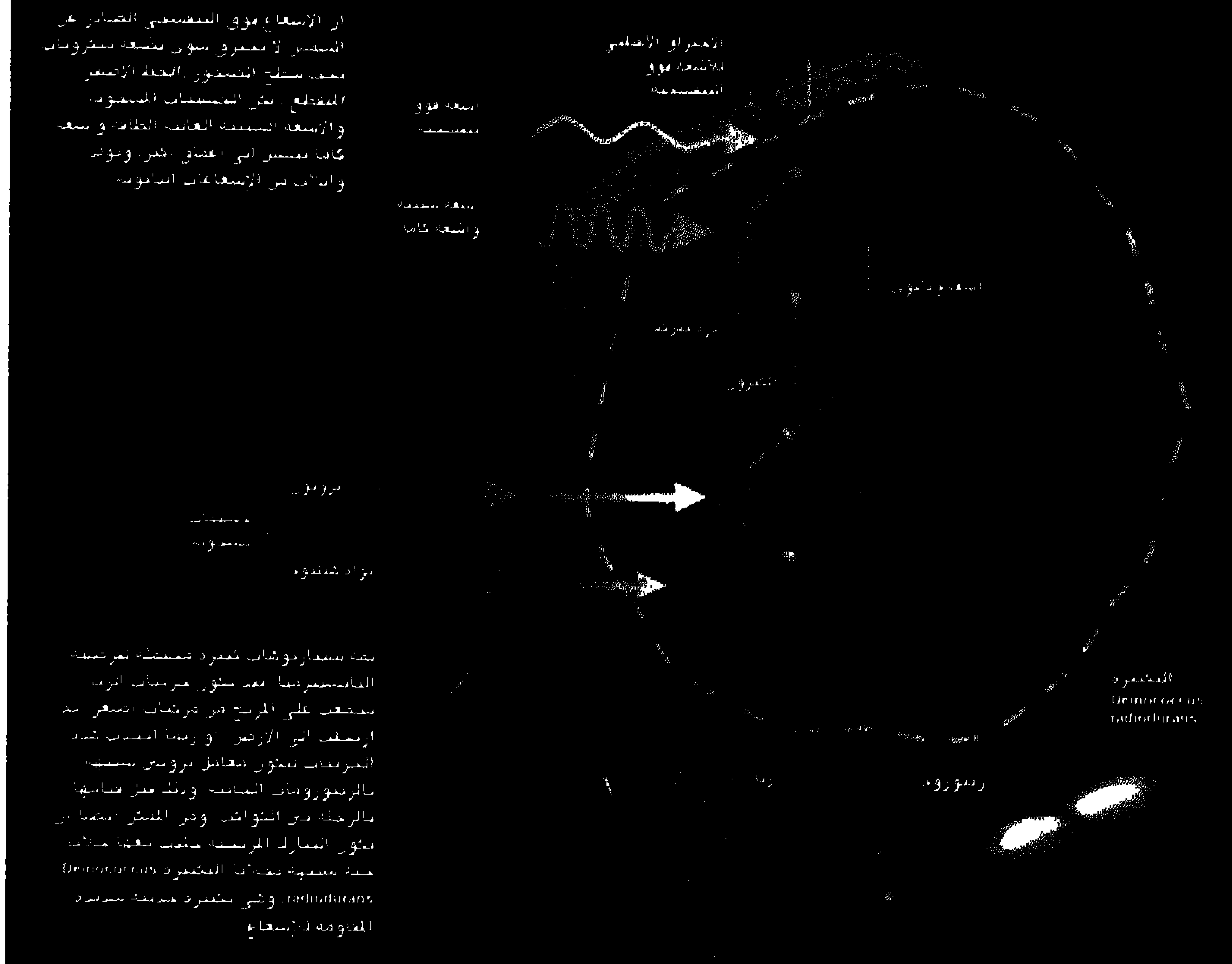
(*) The Interplanetary Express

(**) From philosophy to the Laboratory.

(6) Anaxagoras.

(7) panspermia.

سفينة نوح فضائية(*)



أولاً. وبصرف النظر عن المكان الذي نشأت فيه الحياة، فإنه يتعين عليها أن تنشأ عن مادة غير حية. وقد انتقل موضوع التخليق الحيوي من الميدان الفلسفي إلى التجريبي في الخمسينيات من القرن العشرين، عندما أثبت الكيميائيان (L.S. ميلر) وَ (C.H. أوري) [من جامعة شيكاغو] أنه يمكن توليد الأحماض الأمينية وجزيئات أخرى مهمة للحياة من مركّبات بسيطة يُعتقد أنها كانت موجودة على الأرض في مراحلها المبكرة. ويُظن الآن أن جزيئات الرّنا RNA ربما تجمعت من مركّبات صغيرة وأدّت دوراً رئيسياً في تطور الحياة.

وفي خلايا هذه الأيام، تساعد جزيئاتٌ متخصصةٌ في الرّنا على تكوين البروتينات. وتؤدي بعض الرناوات RNAs دور مراسيل بين الجينات، المكوّنة من الدنا والريبوزومات ribosomes، وهي معامل تصنيع الخلية. وهناك رناوات أخرى تجلب الأحماض الأمينية ــ وهي اللّبنات المكوِّنة للبروتينات ــ إلى الريبوزومات، التي تحتوي بدورها شكلاً آخر من الرنا. وتعمل الرناوات بانسجام مع إنزيمات البروتين التي تساعد على وصل الأحماض الأمينية بعضها ببعض، لكن الباحثين وجدوا أن الرناوات في الريبوزومات تستطيع وحدها أن تنجز الخطوة الحاسمة للاصطناع البروتيني(8) وفي المراحل المبكرة من نشوء الحياة، ربما كانت الإنزيمات جميعها هي رناوات وليست بروتينات. ولما كان من المحتمل أن تكون الإنزيمات الرناوية هي التي صنعت البروتينات الأولى دون حاجة إلى إنزيمات موجودة سابقاً لاستهلال هذه السيرورة، فإن التخليق الحيوي ليس مسألة البيضة والدجاجة كما كان يُظَنّ سابقاً. ومن الممكن أن يكون نظام قَبحيوي (قبل حيوي) prebiotic للرناوات والبروتينات قد طوَّرَ تدريجياً القدرة على مضاعفة أقسامه الجزيئية، بطريقة غير متقنة في بادئ الأمر، لكنها صارت أكثر فعالية مع مرور الوقت.

إن هذا الفهم الجديد لأصول الحياة غيّر الحوارَ العلميَّ حول البانسبيرميا، فلم يَعُدْ يدور حول ما إذا كانت الميكروبات الأولى نشأت على الأرض، أو وصلت إليها من الفضاء. وفي التاريخ

(*) Acosmic Noaks Ark

(8) protein synthesis.

المبكّر المشوّش للمنظومة الشمسية، كان كوكبُنا عرضةً لقصف كثيف بنيازك حاوية على مركّبات عضوية. ومن المحتمل أن تكون الأرض الفتيّة تلقّت أيضاً جزيئات أكثر تعقيداً لها وظائف إنزيمية، وهي جزيئات كانت قبحيوية (قبل حيوية)، لكنها جزء من منظومة كانت تشق طريقها إلى البيولوجيا. وبعد أن حطّت هذه الجزيئات في موقع ملائم للحياة على كوكبنا، فقد تكون واصلت تطورها إلى خلايا حيّة. وبعبارة أخرى، من الممكن حدوث سيناريو متوسط، بمعنى أنه ربّما كان للحياة جذور في الأرض والفضاء كليهما. لكن ما هي المراحل التي حدثت في تطور الحياة وأين؟ وبعد أن ترسّخت الحياة، ما هو مدى انتشارها؟

لقد اعتاد العلماء الذين يدرسون البانسبيرميا أن يركّزوا فقط على تقييم معقولية الفكرة، بيد أنهم اتجهوا أخيراً إلى تقدير احتمال أن تكون المواد البيولوجية انتقلت إلى أرضنا من كواكبَ وأقمار أخرى. وكي تبدأ هذه المواد رحلتَها بين الكواكب، يتعيّن قذفُها من الكوكب الذي انطلقت منه إلى الفضاء نتيجة صدم مذنب أو كويكب لهذا الكوكب *[انظر الإطار في الصفحة 1011]*. وخلال رحلة الصخور أو جسيمات الغبار المقذوفة عبر الفضاء، تكون بحاجة إلى ثقالة gravity كوكب أو قمر آخر كي تجذبها إليه. بعد ذلك، لابد أن تتباطأ سرعتها بقدر كاف لتسقط على سطح الكوكب أو القمر بعد عبورها غلافه الجوي إنْ كان موجوداً. ومثل هذا الانتقالِ يحدثُ كثيراً ضمن المنظومة الشمسية، مع أنه من الأسهل للمواد المقذوفة أن ترتحل من أجسام أبعد عن الشمس إلى أجسام أقرب منها، وأنّ من الأسهل للمواد أنْ ينتهي بها المطاف إلى جسم كتلته أكبر. وفي الحقيقة، توحي المحاكيات الدينامية التي أجراها عالم الفيزياء الفلكية (B. كلادمان) [من جامعة كولومبيا البريطانية] بأن الكتلة التي انتقلت من الأرض إلى المريخ ليست سوى نسبة ضئيلة من الكتلة التي ارتحلت من المريخ إلى الأرض. ولهذا السبب، فإن السيناريو الأكثر شيوعاً الذي تجري مناقشته يتضمن انتقال ميكروبات أو أسلافها من المريخ إلى الأرض.

وتشير محاكياتُ صدم الكويكبات أو المذنبات للمريخ إلى أن المواد المنسلخة عنه يمكن إطلاقها إلى مجموعة واسعة من المدارات. وقد قدّر (كلادمان) وزملاؤه أن المريخ يتعرض كل بضعة ملايين من السنين لصدمة قوية بقدر يكفي لقذف صخور منه تصل في نهاية المطاف إلى الأرض. وعادة ما تكون هذه الرحلة بين الكواكب طويلة، إذ إن معظم المقذوفات المنطلقة من المريخ والتي تقارب كتلها طناً واحداً وتحطّ على الأرض كل سنة، تكون قد أمضت في الفضاء عدة ملايين من السنين. بيد أن ثمة نسبة ضئيلة من الصخور المريخية التي تصل إلى سطح الأرض ـــ صخرة واحدة من عشرة ملايين تقريباً ـــ تكون قد أمضت في الفضاء أقل من سنة. وخلال ثلاث سنوات من حادثة الصدم، يُكمل الرحلةَ من المريخ إلى الأرض نحو 10 صخور وزن كل منها أكثر من 100 غرام. أما الأنقاض التي هي أصغر من ذلك ـــ كالصخور التي هي بحجم الحصيّات وجسيمات الغبار ـــ فهي الأكثر احتمالاً للقيام برحلة سريعة بين الكواكب؛ ونادراً ما تقوم الصخور الكبيرة برحلات كهذه.

تُرى هل تستطيع الكائنات البيولوجية النجاح في قطع هذه الرحلة؟ لننظر أولاً فيما إذا كانت الأحياء الميكروية قادرة على الحياة خلال عملية القذف من الكوكب الذي انطلق منه النيزك؟ لقد وجدت تجارب صدم مختبرية حديثة أن سلالات معينة من البكتريا تستطيع أن تتحمل التسارعاتِ ومعدلاتِ التغيرات في التسارعات التي تواجهها خلال عمليةِ قذف نموذجية عالية الضغط من المريخ. فمن المهم جداً معَ ذلك، ألا يعمل الصدم والقذف على تسخين النيازك إلى حد يكفي لتدمير المواد البيولوجية الموجودة داخلها.

كان جيولوجيو الكواكب يعتقدون بأنه إذا سارت أي مقذوفات منطلقة من المريخ نتيجة صدمه بجسم بسرعات أعلى من سرعة الإفلات[9] المريخية، فلابد أن تتبخر أو على الأقل أن تتصهر كلياً. لكن هذه الفكرة استُبعدت فيما بعد، وذلك عقب اكتشاف نيازك غير متصهرة وفي حالة جيدة جداً، أتتنا من القمر والمريخ. وقد قادت حسابات هذه الاكتشافات (A.J. ميلوش) [من جامعة أريزونا] إلى أنّ نسبة صغيرة من الصخور المقذوفة انطلقت من المريخ عن طريق صدمة من دون أي تسخين على الإطلاق. ولاختصاراً، فقد اقترح (ميلوش) أنه عندما تصل موجة الضغط المتجهة نحو الأعلى والتي يحدثها الصدم، إلى سطح الكوكب، فإنها تتعرض لتغير في الطّور قدره 180 درجة يُلغي تقريباً الضغط داخل طبقة رقيقة من الصخور الواقعة تحت السطح مباشرة. وبسبب تعرض هذه «المنطقة المتشظيّة»[10] لانضغاط منخفض جداً في حين تخضع الطبقات الموجودة تحتها لانضغاط هائل، فمن الممكن أن تُقْذَفَ الصخور القريبة من السطح بسرعات عالية من دون أن تتشوه نسبياً.

لننظر، بعد ذلك، في قابلية البقيا[11] خلال الدخول في الغلاف الجوي للأرض. لقد بيّن (E. أندرز) [الباحث سابقاً في معهد (E. فرمي) بجامعة شيكاغو] أن جسيمات غبار الكواكب تُبطئ من سرعتها باعتدال في الغلاف الجوي العلوي للأرض، وبهذا تتفادى التسخين، وفي المقابل، تتعرض النيازك لاحتكاك شديد، ومن ثم تتصهر سطوحُها نمطياً خلال عبورها الغلاف الجوّيّ. بيد أن الحرارة تتطلب وقتاً لانتقالها بضعة مليمترات على الأكثر إلى داخل النيزك، لذا فإن الأحياء المطمورة في أعماق الصخر تظل حية.

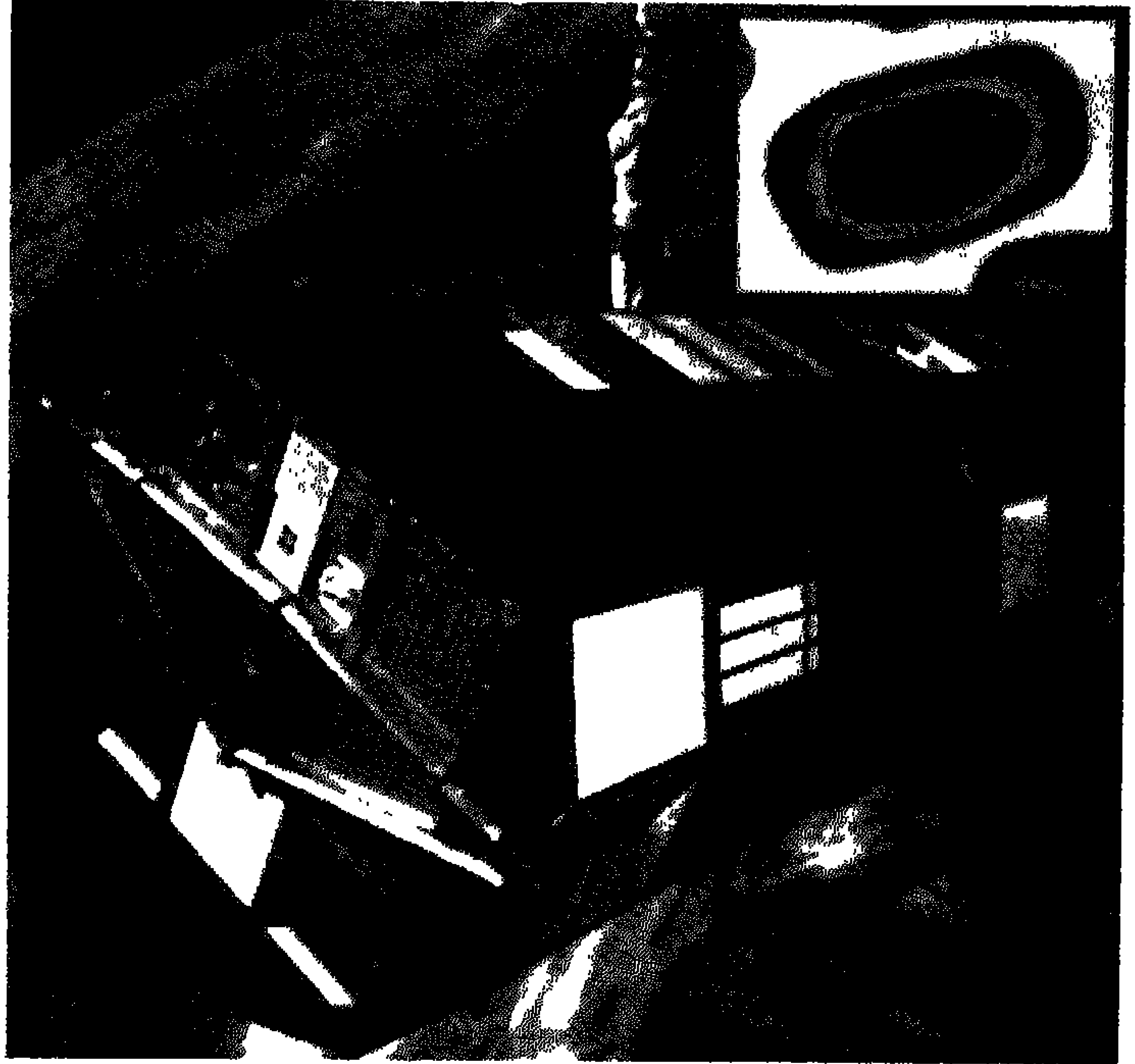
وعلى مدى السنوات الخمس الماضية، نُشرت سلسلة من الأبحاث كتبها أحد مؤلفَيْ هذه المقالة (وايس) وزملاؤه، تمّ فيها

---

(9) Escape Velocity.

(10) spall zone.

(11) survivability.



حمل الساتل LDEF أبواغاً spores من النوع البكتيري Bacillus subtilis (الزاوية العليا اليمنى) وبقيت في مدار الساتل ست سنوات. وقد وجد الباحثون أن غطاءً رقيقاً من الألمنيوم كان كافياً لتكوين درع واق للأبواغ من الأشعة فوق البنفسجية الضارة، مما سمح لثمانين في المئة منها بالبقاء على قيد الحياة.

تحليل نمطين من النيازك المريخية: أولهما النخليات[12]، وهي مجموعة صخور سُلِخَتْ من المريخ نتيجة صدمه بكويكب أو مذنب قبل 11 مليون سنة، والآخر النيزك ALH84001، الذي غادر الكوكب الأحمر قبل ذلك بأربعة ملايين سنة (أصبح النيزك ALH84001 مشهوراً عام 1996، عندما ادّعت مجموعة من العلماء بقيادة (D. ماك كي) [من مركز جونسون الفضائي التابع للوكالة ناسا] أنّه ظهر على هذه الصخرة آثار أحياء ميكروية متحجّرة شبيهة بالبكتيريا الأرضية؛ وعلى الرغم من مرور عقد على ذلك، مازال الباحثون يتجادلون فيما إذا كان هذا النيزك يحمل أدلة على وجود آثار حياة مريخية عليه). ولدى دراسة الخصائص المغنطيسيّة للنيازك وتركيب الغازات المحصورة داخلها، توصّل (وايس) وزملاؤه إلى أن النيزك ALH84001 واثنين على الأقل من النخليات السبعة التي اكتُشفت حتى الآن، لم تُسخَّن إلى أكثر من بضع مئات من الدرجات السيلزية منذ أن كانت جزءاً من سطح المريخ. أضف إلى ذلك أنه لما كانت النخليات صخوراً بدائية محتفظة بنقائها الأصلي، وأنها لم تتعرض لموجات صدم عالية الضغط، فإن الصدم المريخي لم يرفع درجةَ حرارتها إلى أكثر من 100 درجة سيلزية.

إن كثيراً من طليعيات النوى[13] الأرضية وليس جميعها (وهي أحياء بسيطة ذات خلية واحدة، مثل البكتيريا، تفتقر إلى نواة محاطة بغشاء) ومن حقيقيات النـــوى[14] الأرضية (وهي أحياء ذات نوى جيدة التحديد)، تكون قادرة على البقاء على قيد الحياة في هذا المجال من درجات الحرارة. وكانت هذه النتيجة أول دليل تجريبي مباشر على أن المادة يمكن أن تنتقل من كوكب إلى آخر من دون أن تعقَّمَ حرارياً في أي نقطة من مسار انتقالها.

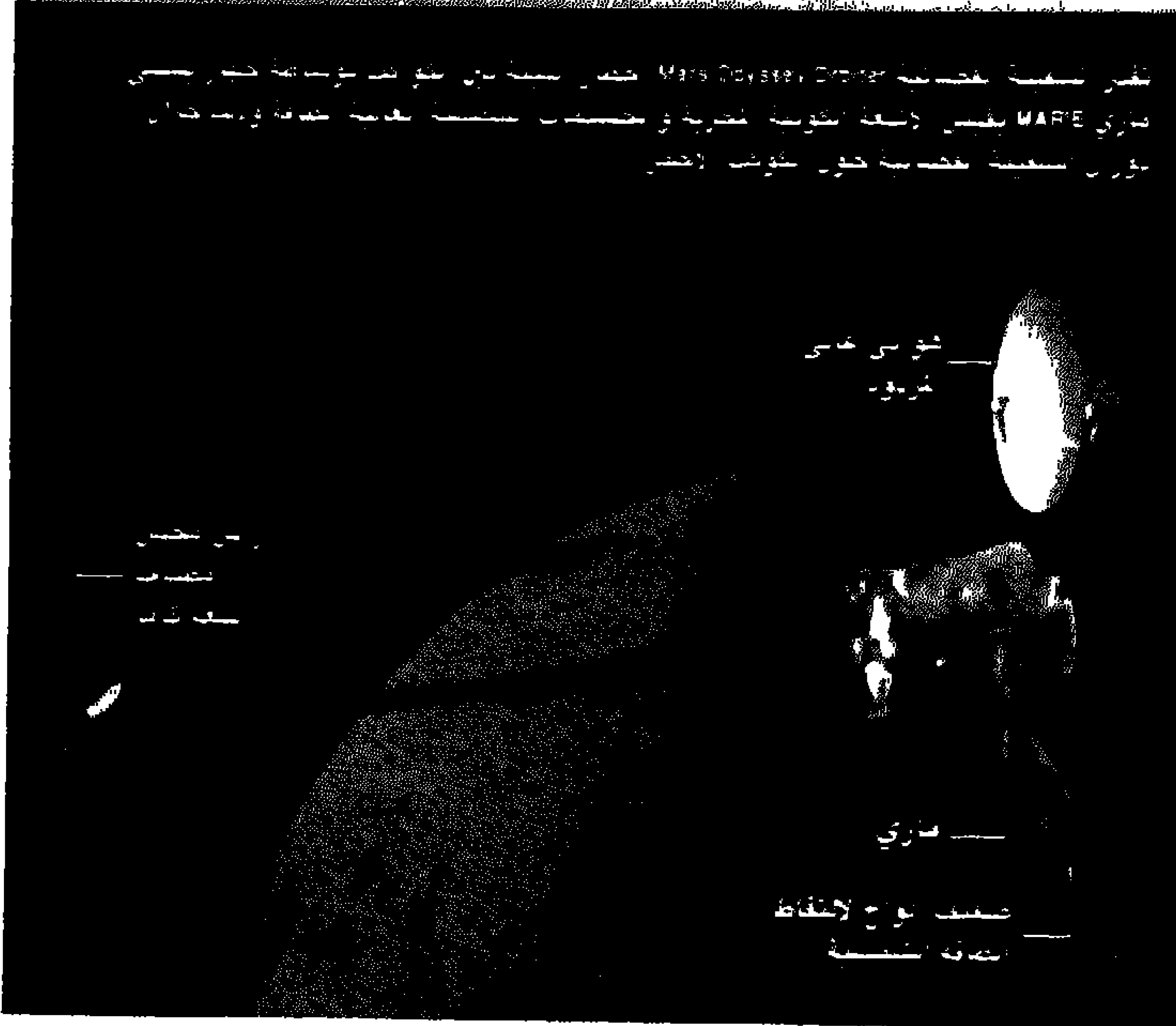
مشكلة الإشعاع(*)

بيد أنه كي تحدث البانسبيرميا، يجب أن تبقى الأحياء الميكروية على قيد الحياة ليس فقط عند قذفها من الكوكب الأول ودخولها إلى الغلاف الجوي للكوكب الثاني بل أيضاً خلال الرحلة ذاتها بين الكواكب. فالنيازك وجسيمات الغبار الحاملة للحياة تتعرض لخلاء الفضاء، وللتطرّفات في درجات الحرارة، ولأنواع مختلفة أخرى من الإشعاع. والأهم، بوجه خاص، ضوء الشمس فوق البنفسجي العالي الطاقة الذي يحطم الروابط التي تُبقي ذراتِ كربونِ الجزيئاتِ العضوية متماسكة. لكن الوقاية من الأشعة فوق البنفسجية سهلة جداً، إذ يكفي مجرد بضعة أجزاء من المليون من المتر من مادة معتمة لوقاية البكتيريا.

وفي الحقيقة، فقد بيّنت دراسة أوروبية تستخدم الساتل[15] LDEF ـــ التابع للوكالة ناسا، والذي أطلقه المكوك الفضائي عام 1984 واستُرجِعَ من مداره بوساطة المكوك بعد ست سنوات ـــ أن

(12) nakhlites.
(13) prokaryotes.
(14) eukaryotes.

(*) The Problem of Radiation.
(15) Long Duraion Exposure Facility.



تقدّر السفينة الفضائية Mars Odyssey Orbiter أخطار البيئة بين الكواكب بوساطة جهاز يسمى ماري MARIE يقيس الأشعة الكونية المجرية والجسيمات الشمسية العالية الطاقة وذلك خلال دوران السفينة الفضائية حول الكوكب الأحمر.

غلافاً رقيقاً من الألمنيوم وفّر درعاً مناسباً لوقاية أبواغ[16] البكتيريا من النوع Bacillus subtilis. ومن بين الأبواغ spores التي يحميها الألمنيوم، والتي هي مع ذلك معرضة لتطرّفات خلاء الفضاء ودرجة حرارته، ظلّ 80 في المئة منها عيوشاً[17] ـــ وفي نهاية البعثة ـــ أعاد الباحثون تنشيطها إلى خلايا بكتيرية فاعلة. وفيما يتعلق بالأبواغ غير المغطّاة بالألمنيوم ـــ وبذلك تكون معرضة لأشعة الشمس فوق البنفسجية ـــ فقد تلف معظمُها، لا جميعها. وقد بقي على قيد الحياة واحد من كل عشرة آلاف من الأبواغ غير المحمية بالألمنيوم، كما زاد وجود مواد مثل الگلوكوز والأملاح من معدلات بقائها على قيد الحياة. وتجدر الإشارة إلى أنه حتى في حال جسم صِغَرُه يعادل صغر جسيم من الغبار، فإن أشعة الشمس فوق البنفسجية لا توفر بالضرورة تعميقاً كاملاً لمستعمرة ميكروبية فيه. وإذا كانت المستعمرة موجودة داخل جسم كبير بحجم الحصيّة، ازدادت وقاية الأشعة البنفسجية ازدياداً حاداً.

هذا وإن الدراسة التي أجريت باستخدام الساتل LDEF نُفّذت عندما كان الساتل في مدار أرضي منخفض، ومن ثم كان موجوداً داخل الحقل المغنطيسي الواقي للأرض. لذا فإن هذه الدراسة لا توفر الكثير من المعلومات عن آثار الجسيمات المشحونة الموجودة بين الكواكب والتي لا تستطيع اختراق غلاف الأرض المغنطيسي[18]. وتولّد الشمسُ، من وقت إلى آخر، دفقات من الأيونات والإلكترونات الطاقيّة. إضافة إلى ذلك، فإن الجسيمات المشحونة هي مركّبة رئيسية للإشعاع الكونيّ المجري الذي يقوم دائماً بقصف منظومتنا الشمسية بوابلاته. إن وقاية الأشياء الحية من الجسيمات المشحونة، وأيضاً من الأشعة العالية الطاقة، مثل أشعة گاما، أعقد من وقايتها من الأشعة فوق البنفسجية، إذ إن طبقة صخرية لا يتجاوز سمكها بضعة ميكرونات تقي من الأشعة فوق البنفسجية، في حين أن إضافة مزيد من وسائل الحجب تزيد جرعةَ أنماط أخرى من الإشعاع. والسبب هو أن الجسيمات المشحونة والفوتونات العالية الطاقة تتآثر مع مادة الحجب الصخرية، وهذا يولّد وابلات من الإشعاع الثانوي داخل النيزك.

قد تتمكن هذه الوابلات من الوصول إلى أي ميكروبات موجودة داخل الصخرة ما لم تكن الصخرة كبيرة جداً، أي ما لم يكن قطرها نحو مترين أو أكثر. وكما لاحظنا سابقاً، فمن النادر جداً أن تقوم الصخور الكبيرة برحلات سريعة بين الكواكب. ومن ثم، فإضافة إلى الوقاية من الإشعاع فوق البنفسجي، ما يهمنا حقاً هو درجة مقاومة الميكروب لجميع مركّبات الإشعاعات الفضائية، ومعرفة السرعة التي يسير بها النيزك الحامل للحياة من كوكب إلى آخر. وكلما قَصُرَت الرحلة، انخفضت الجرعة الكلية للإشعاع، ومن ثم ازدادت فرصة البقاء على قيد الحياة.

---

(16) spores جسم وحيد الخلايا، أو متعدد الخلايا لا جنسي يمكن أن يكون هاجعاً أو تكاثرياً، وهو مقاوم للبيئة غير الملائمة.

(17) viable.

(18) magnetosphere.

وفي الحقيقة، فإن البكتيرة Bacillus subtilis قوية بعض الشيء فيما يتعلق بمقاومتها للإشعاع. والأشد قدرة على الاحتمال هو البكتيرة Deinococcus radiodurans، وهي نوع بكتيري اكتشفه في خمسينيات القرن العشرين العالم الزراعي (W.A. أندرسون). ويتحمل هذا المتعضي الحيّ الجرعات الإشعاعية التي تُستعمل في تعقيم المنتَجات الغذائية، بل إنه ينمو حتى داخل المفاعلات النووية. هذا وإن الآليات الخلوية نفسها، التي تساعد البكتيرة D. radiodurans على ترميم الدنا التابع لها، تبني جدراناً من الخلايا ذات سُمك إضافي، وتقي نفسها بطريقة أخرى من الإشعاع وتلطِّفُ أيضاً الضرر الناجم عن التجفاف[19]. ومن الناحية النظرية، فإذا كانت المتعضيات الحية التي تتمتع بمثل هذه القدرات مطمورة داخل المادة التي قُذِفَتْ من المريخ بالطريقة التي قذفت بها النخلياتُ والنيزك ALH84001 (أي من دون تسخين مفرط)، فإن بعض شُذَف تلك المتعضيات الحية سيظل عيوشاً في الفضاء بين الكواكب بعد عدة سنوات، وربما بعد عدّة عقود.

بيد أن البقيا الفعلية الطويلة الأمد للمتعضيات الحية الناشطة أو الأبواغ أو الجزيئات العضوية المعقدة خارج غلاف الأرض المغنطيسي، لم يجر اختبارها قط ومثل هذه التجارب، التي تضع المواد البيولوجية ضمن موادّ محاكية نيزكية، وتُعرِّضُها لبيئة الفضاء بين الكواكب، يمكن إجراؤها على سطح القمر. وفعلاً، فقد حملت بعثات أبولّو القمرية، بوصفها جزءاً من انخراط أوروبي مبكر في دراسة الإشعاع، عينات بيولوجية. ومع ذلك، لم تستمر أطول بعثة لأبولو أكثر من 12 يوماً، وقد أُبقيت العيّنات في سفينة أبولّو الفضائية، ومن ثم لم تتعرض لبيئة الإشعاع الفضائي كلها. وفي المستقبل، قد يضع العلماء رزماً تجريبية على سطح القمر، أو يطلقونها في مدارات بين الكواكب مدة عشر سنوات قبل إعادتها إلى الأرض لإجراء تحاليل مختبرية عليها. وحالياً ينكب الباحثون على دراسة هذه المقاربات.

وفي الوقت الحاضر. ثمة دراسة طويلة الأمد ماضية قدماً اسمها تجربة بيئة الإشعاع المريخي[20] (ماري MARIE). هذا وإن آلات (ماري) ــ التي أطلقتها وكالة ناسا عام 2001 كجزء من السفينة الفضائية Mars Odyssey Orbiter ــ تقوم بقياس جرعات الأشعة الكونية المجرية والجسيمات الشمسية الطاقيّة خلال دوران السفينة الفضائية حول الكوكب الأحمر. ومع أن (ماري) لا تحتوي مواد بيولوجية، فإن محسِّاتها مصمّمة للتركيز على مدى الإشعاع الفضائي الذي يُحدِث أكبرَ أذى للدنا.

دراسات مستقبلية(*)

بيَّنا فيما سبق أن البانسبيرميا مقبولة نظرياً. إلى ذلك، فقد مهّدت سمات مهمة لهذه الفرضية السبيلَ للتحول من مجرد قبولها إلى اعتبارها علماً كمياً. وثمة أدلة نيزكية تبين أن المادة انتقلت بين الكواكب في جميع تاريخ المنظومة الشمسية، وأن هذه العملية مازالت جارية بمعدل حُدِّدَ تحديداً جيداً. أضف إلى ذلك أن ثمة دراسات مختبرية أظهرت أنه يُمكن لنسبة عالية من الأحياء الميكروية الموجودة ضمن قطعة من مادة كوكبية مقذوفة من كوكب بحجم المريخ، أن تظلَّ على قيد الحياة بعد قذفها إلى الفضاء واختراقها الغلاف الجوي للأرض. إلاّ أنّ هناك جوانبَ أخرى من فرضية البانسبيرميا يصعب فهمها. فالباحثون بحاجة إلى مزيد من البيانات ليحددوا ما إذا كانت المتعضيات الحية المقاومة للإشعاع، مثل البكتيرة D. radiodurans تستطيع العيش خلال رحلة بين الكواكب. بل إن هذا البحث لن يبيّن احتمالَ أنّ هذا حدث فعلاً في حالة المحيط الحيوي للأرض؛ لأن هذه الدراسات تتضمن أشكال الحياة الأرضية الموجودة حالياً، أمّا المتعضيات الحية التي كانت تعيش قبل بلايين السنين فربما صارت أحوالها أحسن كثيراً أو أسوأ كثيراً.

إضافة إلى ذلك، لا يستطيع العلماء وضع تقدير عددي دقيق لاحتمال وجود الحياة حالياً، أو وجودها في وقت من الأوقات، على الكواكب باستثناء كوكب الأرض. وببساطة، لا يعرف الباحثون الكثير عن أصل أي نظام للحياة، بما في ذلك نظام الحياة على الأرض.



(19) dehydration.

(20) Martian Radiation Environment Experiment.

(*) Future Studies.

[illegible]

تكاثف بوز ـ آينشتاين في المرحلة الغازية

يوجد في المختبرات ومنذ بضع سنوات غازات فائقة البرودة ذات خصائص بعيدة كلّ البعد عن الحدس العادي. ويحتل الجزء الأكبر من ذرات هذه الغازات حالةً كوانتية واحدة، مؤكداً بذلك النبوءة التي أطلقها آينشتاين لخمس وسبعون سنة خلتْ. إن اكتشاف هذه الغازات المشكلة من الذرات أتاح إثبات صلاحية النظريات التي صيغت منذ عشرات السنين لوَصْف عمل الهيليوم السائل فائق السيولة. كما يفتح هذا الاكتشاف الطريق أمام تحقيق مصادر ذرية متجانسة معادلة، من أجل أمواج المادة، للمصادر: "المازر" و"اللازر" للأمواج الكهرومغناطيسية.

نبوءة آينشتاين:

في العام 1944، حصل ألبرت آينشتاين على مشروع مقالٍ كتبه عالم فيزيائي شاب من البنغال يدعى "ساتياندرا بوز"، يبرهن فيه على قانون "بلانك" الخاص بتوهج الجسم الأسود، وذلك بمعالجة "الفوتونات" كغاز مؤلف من الجزيئات المتماثلة. وإذ أثار مشروع المقال هذا اهتمام آينشتاين، فقد عمد إلى ترجمته إلى اللغة الألمانية على نشره. ثم قام بتعميم هذه الفكرة حول وجود غاز من جزيئات مادية.

وفي مقال ثانٍ نشر في العام 1925، أثبت آينشتاين خاصيةً استثنائية لنظام الجزيئات المادية هذا، وذلك على النحو التالي:

إذا كانت الكثافة الفضائية أكبر من القيمة الحرجة المعطاة بالقانون:

$$n_c \cong \frac{0,166}{\hbar^3}(mk_B T)^{3/2}$$

حيث k و h ثابتتان لـــ "بولتزمان" و"بلانك"، و (m) كتلة الجزيئات، فإن جزءاً عيانياً من الذرات "يتكاثف" في حالة من القدرة الأدنى، أي حالة الذبذبة المعدومة لحيّز حصر كبير كيفياً. إن صياغة معادلة تعني مقارنة المسافة الوسطية بين الجزيئات $d = n^{-1/3}$ بطول موجة دوبرغلي الحرارية:

$$\lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2 / mk_B T}$$

فحين تكون الكثافة d كبيرة أمام λ، فإن تصرف الغاز يكون قريباً من التصرف الذي تتنبأت به نظرية الغازات التقليدية. وبالمقابل حتى تزداد نسبة λ على d وتصبح بحدود الوحدة، تنشأ ظاهرة التكاثف. وهكذا حين تكون λ =2d يتنبأ آينشتاين بأن ثلثي جزيئات الغاز يجب أن تشغل الحالة الكوانتية الأساسية.

"إنها نظرية جميلة، ولكن هل تنطوي على حقيقة؟". بهذه الكلمات وصف آينشتاين النتيجة التي توصل إليها في رسالة وجهها إلى "بول إيهرنفيست" قبل أن يتخلى نهائياً عن ظاهرة التكاثف. وقد ظلت هذه الريبة بشكل عام طوال السنوات التي تلت ذلك. وتوجب الانتظار حتى العام 1937 مع اكتشاف سيولة الهيليوم ذي التمييع الفائق لكي يُعاد النظر وباهتمام بنبوءة آينشتاين. لقد لاحظ "لندن" أن حرارة الانتقال فائق السيولة Th = 2,2k قريبة بشكل مدهش من حرارة تكاثف بوز آينشتاين لغاز كامل له نفس كثافة الهيليوم السائل Tc = 3,2k وفكّر في أن تكون هاتان الظاهرتان مرتبطتين فيما بينهما.

إن ملاحظة "لندن" هذه هي في أساس النماذج النظرية الحديثة النظرية الحديثة للهيليوم السائل. إن الهيليوم هو مجموعة من جزيئات spin الكامل (وهنا صفر). ومن المنطقي أن تُطبق عليه مبادئ الستاتية (التكاثف) التي اكتشفها بوز وآينشتاين. لكننا نعلم أيضاً أن العلاقة بين تكاثف بوز وآينشتاين والسيولة الفائقة ليست حديثة العهد، إذ يرجع أصل السيلة الفائقة إلى تفاعل الجزيئات فيما بينها، في حين أن نموذج آينشتاين ــ وهذه إحدى سماته المدهشة ــ يستخدم غازاً كاملاً. غير أن الهيليوم السائل ظلّ منذ أبحاث "لندن" المثال النموذجي لغاز بوز ــ آينشتاين من ذرات، والذي نجده في كتب الفيزياء الساكنة كافةً.

الغازات الذرية:

إن البحث عن أنظمة أكثر قرباً من نموذج آينشتاين الأصلي أصبح نشطاً جداً في خلال الأعوام العشرين الأخيرة. فقد أتاح تطوير تقنيات عزل وتبريد الذرات بوساطة حزم مضيئة أو حقول مغناطيسية ساكنة تذليل العقبات التي عرقلت سابقاً هذا البحث. ففي العام 1995، وفي مدينة بولدر، تكللت جهود هذا البحث بالنجاح حين اكتشفت مجموعة "إي كورنيل"، وسي. ويمان" غاز الروبيديوم الذري. ثم تبعه بعد ذلك وبوقت ضئيل اكتشاف غازات مماثلة له مثل: غاز الليثيوم وغاز الصوديوم وغاز الهيدروجين الذرية.

ما هي الأدوات الضرورية لبلوغ هذا النجاح؟ إننا نأمل في الاقتراب من فرضية آينشتاين الأساسية، أي العمل على غاز مميّع جداً وليس سائلاً كما الحال في غاز الهيليوم. إن الثمن الذي ينبغي لنا أن ندفعه يظهر حالاً على هذه المعادلة (1): حين تنخفض الكثافة الفضائية للنظام المعني في بحثنا، فإن حرارة الانتقال (أو التحول) تنخفض أيضاً. إن هذه الغازات الذرية تتشكل حين تكون كثافتها قريبة من 10^{19} ذرة م^3 (بدلاً من 10^{27} ذرة/ م^3 للهيليوم السائل) وتكون حرارة التكاثف في مجال الميكروكالفين أو ما فوق.

إن صعوبة هذه الحرارة تفرض وجود نقطة مشتركة على كل هذه التجارب: إن حصر (أو عزل) الغاز الذري لا يتم بوساطة جدران (أو أغلفة) مادية وإلا لأُلصقت هذه الذرات بمجملها على الجدران فلا تعود تتحرك. ولذا يتم حصر (أو عزل) هذا الغاز بوساطة حقل مغناطيسي غير متجانس يبقيه معلقاً في مركز حوض حيث يسود فراغ مطلق (10-9p). وتحمل كل ذرة لحظة مغناطيسية u وتتخذ حقل مغناطيسي محلي من أجل أن تنتج طاقة ذات عمل بيني $E = - u . B$ وتلعب هذه الطاقة دور طاقة كمونية لحركة مركز كتلة الذرة، فيما تقوم القوة المغناطيسية الناجمة عن ذلك بحبس الذرة.

لنأخذ على سبيل المثال ذرة قريبة من النقطة 0 حيث مدى [B (r)] الحقل المغناطيسي في أدنى قيمة. إذا كان للحظة المغناطيسية للذرة اتجاه معارض لاتجاه الحقل المغناطيسي المحلي، تكون الطاقة النووية على النحو التالي:

$$E(\vec{r}) = -\vec{\mu}.\vec{B}(\vec{r}) = /\vec{\mu}//\vec{B}(\vec{r})/.$$

إن هذه الطاقة الكمونية هي نفسها في حدها الأدنى داخل النقطة 0 وستقوم الذرة بإجراء ذبذبات ثابتة حول هذه النقطة. في الظروف العادية لعمل الفخاخ المغناطيسية، تجري هذه الذبذبات بتردد بحدود 100 هيرتز. والتقريب الذي يدعو إلى افتراض أن u و B تظلان على الدوام مضادتين متوازنين قد تم التحقق منه على نحو جيد جداً.

يمكننا أيضاً التفكير بالعمل على مقربة من نقطة حيث مدى الحقل المغناطيسي أعظمي وحصر ذرات لحظتها المغناطيسية موازية للحقل. غير أن معادلات السّتاتية المغناطيسية تمنع وجود حدّ أعظمي كهذا، إلا إذا تمّ التمركز داخل مغناطيس أو الوقوف على سلك يمرّ به تيار. ولما كان مثل هذا الحل لا يتلاءم مع استقرارية غاز ذري مطلوب، فإننا نكتفي بالفخاخ المركزة على حقل مغناطيسي أدنى.

كيف السبيل إلى وضع ذرات فخ مغناطيسي؟ نقوم بتحضير سحابة ذرية باردة إلى أقصى حد ممكن بالقرب من النقطة 0 ونوصل التيار الكهربائي بسرعة مع وشيعات تنتج الحقل المغناطيسي الذي يوقع الذرات بالفخ. وتوجه اللحظات المغناطيسية للذرات بوقت واحد بالاتجاه المعاكس لاتجاه الحقل بفضل حزمة مضيئة. وتؤمن هذا الحزمة الضخ البصري للغاز حسب تقنية وضعها كل من ألفرد كاسلتر وجان بروبيل بين عامي 1950 و1960. إن الذرات التي تكون طاقتها الحركية أدنى من عمق الحوض يتم أسرها. وبذلك نتمكن في خلال بضع دقائق من الاحتفاظ بمجموعة من الذرات، حيث أن الفاصل الوحيد هو الغاز الكامن في الحوض المفرّغ من الهواء حيث تجري التجربة: فإذا ما اصطدمت جزيئة غاز كامن بذرّة أسيرة، تراجعت هذه الأخيرة وأفلتت من الفخ.

إن جود الفخ لا يغير بشكل ملموس معيار التكاثف التي تعطيه المعادلة (1) شريطة أن تدل على الكثافة في وسط الفخ وأن يكون عدد الذرات الموجودة في الفخ، على عتبة التكاثف كبيراً. وبشكل عملي، يكون هذا العدد بحدود المليون وبذلك يمكن تطبيق نبوءة آينشتاين بدون أية مشكلة.

ثم إن التبريد الأصلي للسحابة الذرية بشكل عام بفضل أشعة "لايزر" إضافية، يسمح ببلوغ درجات حرارة أدنى من 100 ميكروكلفن. لقد تمّ تقديم مبدأ التبريد المضيء في مجلة "صور الفيزياء 1990" ويقوم هذا المبدأ على الاستفادة من تبادلات النبض بين الضوء والذرات من أجل خفض الاضطراب المرور للغاز. وهو يتيح الاقتراب بشكل منظور من شرط تكاثف، بوز — آينشتاين..، رافعاً النسبة λ/d/ من 10-6 (للبخار الذري الأساسي) إلى 10-2 (من أجل "فخ مغناطيسي بصري") وحتى الآن، لم يكن من الممكن بلوغ عتبة التكاثف1 ~ λ /d باستخدام التبريد بالليزر فقط. وفي الحقيقة، وبدرجة حرارة منخفضة وكثافة عالية، يظهر أثر سيء للضوء: إذ يساعد الضوء على تشكّل جزيئات من ذرات نحاول تكثيفها، مما يؤدي إلى هدر كميات كبيرة من هذه الذرات من أجل بلوغ عتبة التكاثف.

التبريد التبخّري:

بعد إحكام الفخ المغناطيسي، يتوجب دفع الغاز نحو التكاثف وذلك باستخدام وسائل مرتبطة بشكل مباشر بالفخ نفسه، وليس بوسائل أخرى، ومن أجل ذلك، تمّ التفكير أولاً بزيادة التيار في الوشيعات التي تنتج الحقل، مما يخلق كموناً حاصراً أكثر شدة وبالتالي كثافة مركزية عالية أكثر. ولكن من سوء الحظ أن الحرارة في هذه العملية تزداد أيضاً ولا تتغير نسبة λ/d. إن نجاح التجارب الأخيرة نجم عن تقنية قديمة جداً ويعرفها كل الأولاد الذين توجب عليهم أحياناً ابتلاع صحن من الحساء الحار جداً، فكانوا يعمدون إلى النفخ عليه لكي يبرد. إن هذا التبريد ليس مردّه إلى اختلاف الحرارة بين السائل والغاز المنفوخ، بل إلى تبخّر الحساء بسبب التهوية التي يحدثها الطفل بوساطة النفخ. إن نزع جزيئة من السائل يكلّف طاقة تُستنفذ من السائل المتبقي. وهكذا يتم التعرف بالطريقة نفسها فيما يتعلق بالذرات المحبوسة، وذلك بإنقاص عمق الكمون الذي يحبس الذرات إلى ارتفاع أكبر بقليل من الطاقة الحركية المتوسطة للذرات المحبوسة. وهكذا تفلت الذرات الأسرع من الفخ، في حين تعود الذرات المتبقة إلى حرارة أدنى من الحرارة الأصلية. ويمكننا أن نبرهن بأن الكثافة في مركز الفخ تزداد أثناء هذا التبخّر. وبالتالي فإننا ننجح من خلال متابعتها ولفترة طويلة في بلوغ عتبة التكاثف.

وبخلاف ملعقة الحساء التي ينخفض حجمها قليلاً جداً بفعل التبخر، ينبغي التضحية بكثير من الذرات من أجل بلوغ هدفنا. بما

أن النسبة (العلاقة) λ/d لا تساوي سوى 10-2 بعد تحميل (أو شحن) الفخ، ينبغي علينا إذاً أن نكسب عدة ارتفاعات في الحرارة وفي كثافة الغاز الفضائية. ويتم الحصول على هذا التبخر بالحفاظ على نسبة التصادم المرنة بين الذرات ثابتة. وهكذا فإن عملية rethermalisation الجزيئات المتبقة في الفخ تجري بشكل فعال. إن نسبة التصادم collision تتناسب مع الكثافة الفضائية والسرعة الحرارية للذرات، أي $1/(\lambda d^3)$.

إن عملية حسابية بسيطة تثبت بأنه ينبغي زيادة λ بعامل 30 وإنقاص.. بعامل d لكي نكسب زيادتين متتاليتين ضروريتين على نسبة λ/d ولما كان كمون التنفيخ منسجماً، فإن بالإمكان الإثبات بأن عدد الذرات الحاضرة يتناسب مع $(\lambda d)^{-3}$ إذن ينبغي تقسيم هذا العدد على 1000 أثناء التبخر! وبشكل عملي، فإننا نستخدم نحو مليار ذرة في الفخ المغناطيسي من أجل الانتهاء مع مليون ذرة فقط. وبهذا الثمن المرتفع يتم تشكيل غاز بوز ــ آينشتاين الذري في مركز الفخ.

من أجل تعديل ارتفاع بئر (حوض) الكمون المغناطيسي الذي يحبس الذرات، حسب مشيئتنا، نستخدم موجة نبض pulsation راديوية قابلة للضبط. تقوم هذه الموجة بقلب اللحظات المغناطيسية المنسجمة (المتناغمة) معها، أي تلك الموجودة على سطح حقل مغناطيسي مُعطى، مثل mb=hw حيث m هي اللحظة المغناطيسية لذرة. إن القيمة الأصلية (الأساسية) (w) كبيرة: وهذا يتطابق مع عمق مرتفع لبئر (حوض) الكمون ويساعد حتى في حبس ذرات ذات طاقة كبيرة (ميليكلفن). ويتم التبريد التبخري القسري بإبقاء التيار الذي يخلق الفخ المغناطيسي ثابتاً وبتقليص (w) تدريجياً. إن القيمة النهائية للتردد الراديوي يطابق حقلاً مغناطيسياً B مجاوراً للقيمة الدنيا للفخ المغناطيسي المفترض. إن عمق حوض الكمون في نهاية التبخّر يكون ضعيفاً جداً وبحدود بضعة ميكرو كلفينات فقط.

كيف نرى غازاً ذرياً؟

تتم مراقبة هذه الغازات من الذرات (الكمكثفات الذرية الغازية) بإضاءتها بومضة ضوئية قصيرة نقيس بها فيما بعد الامتصاص أو dephasage بالمجموعة الذرية. وهكذا نحصل على (نصل إلى) التوزع الفضائي للذرات في الكمون المغناطيسي. ويمكننا أيضاً إيقاف (فك) الفخ المغناطيسي وترك المجموعة الذرية تنتشر خلال مدة لا تزيد عن بضع عشرات من الميليثوان، قبل إرسال الومضة المشعة، ثم نستنتج التوزع بالسرعة الأصلية من خلال السحابة الذرية المنتشرة.

الشكل (2) يظهر هذا المبدأ. إن الشكلين 2a و2b هما صورتان في المكان in situ تبيّنان توزّع الذرات داخل الفخ المغناطيسي. ولتوزّع (انتشار) الذرات شكلُ "سيغار"، وهو ينجم عن عدم التشابه القوي للفخ. إن الوجود المحتمل لذرات غازية تظهره بشكل واضح الكليشهات التي تبيّن التوزيعات السريعة (2c,d). فيما يتعلق بالصورة 2 التي التُقطت من أجل كثافة أدنى من الكثافة الحرجة، فإننا نحصل على توزّع سريع شبه متشابه، كما هو متوقع ابتداءً من توزّع الطاقة المتعادل لغاز تصفه جيداً الفيزياء الستاتية الكلاسيكية. وعلى العكس من ذلك، تظهر الكليشة 2d، التي التقطت من أجل كثافة مركزية أعلى من الكثافة الحرجة، توزعاً سريعاً غير متشابه مطلقاً، إذ أن الاتجاه الأكثر حصراً للفخ المغناطيسي هو ذاك الاتجاه الذي يتمتع بانتشار سريع أكبر. إن هذه النتيجة المباشرة لعلاقة هايزنبرغ غير المؤكدة تظهر بأن الذرات قد تراكمت هنا في الحالة الأساسية للفخ المغناطيسي: إن لها كلها وظيفة التردد نفسها، والذي توزعه (انتشاره) الأفقي أكبر من توزعه العمودي بسبب عدم تشابه خواص الفخ المغناطيسي. وبالمقابل فإن التوزع العمودي للسرعات أكبر من التوزع الأفقي.

إن هذا النوع من الصور يسمح بالحصول على معلومات كمية حول الذرات الصلبة، مثل عدد الذرات والحرارة الباقية residuelle المضافة إلى الجزء من الذرات غير المكثفة.

وبذلك نكون قد تحققنا، وبدرجة كبيرة من الدقة، من أن حرارة التحول كانت أعطيت لنا بواسطة المعادلة (1). وكذلك استطعنا الحصول على مكثفات ذرية غازية نقية عملياً، يكون فيها الجزء غير المكثف غير متجاوز لـ 15% من عدد الذرات الكامل (وتحت هذه القيمة، يغدو من الصعب جداً قياس هذا الجزء).

ديناميكية المكثفات الذرية الغازية:

إن إمكانية مراقبة مكثفات "بوز ــ آينشتاين" الذرية الغازية قد أتاح مطابقة دقيقة جداً للنماذج النظرية مع القياسات التجريبية. إن هذه النماذج التي طوِّرت في الأساس للتأكد من سيولة الهيليوم السائل ذي التمييع الفائق لم تختبر كمياً بسبب تعقيد العمليات التي تطرأ داخل السائل.

كيف نصف نظرياً مكثفاً ذرياً غازياً؟ لنلاحظ في البدء، وعلى عكس حال الغاز قبل التكاثف الذي يكون مميّعاً جداً وقريباً من غاز متكامل، أن الوصف النظري لمكثف بوز ــ آينشتاين يتطلب أن نأخذ بالحسبان التفاعلات المتبادلة بين الذرات: إن تراكم المكثف الذري الغازي في مقرّ حوض ذي قوة مغناطيسية يقود أو يؤدي إلى كثافة فضائية قدرها 10^{20} ذرة/م^3 لا يسري معها نموذج الغاز الكامل. ومن حسن الحظ أن هذه التفاعلات المتبادلة (البينية) بين الذرات المكثفة موصوفة بشكل جيد جداً بوساطة نظرية الحقل المتوسط. ولهذا السبب يمكن أن نفترض بأن الذرات كافة هي في الحالة الكوانتية نفسها وموصوفة بتابع موجة وحيدة. إن "تابع موجة المكثف الذري" هو الحل لمعادلة "شرودينجر" التي تتيح تدخل طاقة الذرات الحركية وقدرة الحصر المغناطيسي، وحدّاً غير خطيّ يصف تأثير المكثف الذري الغازي على نفسه.

إن حدّ (عبارة الحقل المتوسط يمكن أن يكون طارداً أو جاذباً حسْب النوع الذري المعني. وهذه النقطة تلعب دوراً رئيسياً من أجل تصرف المكثف الذري الغازي. فبالنسبة للهيدروجين والصوديوم أو الروبيديوم، يطابق الحقل المتوسط (الوسطي) عملاً بينياً طارداً (نابذاً). وهنا يمكننا أن نضع رقماً (عدداً) عالياً بشكل تعسفي من الذرات في المكثف الذري الغازي الذي يتزايد حجمه

التوازني مع عدد الذرات. وعلى العكس من ذلك، فإن حقلاً متوسطاً جاذباً كما هو الحال بالنسبة لليثيوم 7، يحدد أو يحصر عدد الذرات القابلة للتكاثف. وإذا تم تجاوز عدد الذرات إلى أكثر من ألف ذرة، فإن المكثف الغازي الذري ينهار على نفسه. فتتشكل جزيئات وتفلت من الفخ المغناطيسي.

التفاعلات البينية في مكثفة ذرية غازية ومعادلة شرودنجر غير الخطية:

بخصوص الكثافات الفضائية العالية نسبياً لمكثفات بوز ــ آينشتاين الذرية الغازية، لا يسعنا أن نتجاهل التفاعلات البينية بين الذرات نفسها، إذ تلعب هذه الأخيرة دوراً أساسياً لتحديد الخصائص الستاتية للمكثفة الذرية الغازية ــ حجم، طاقة ــ وكذلك خصائصها الديناميكية ــ أشكال الاهتزاز، السيولة الفائقة ــ إن أخذ هذه التفاعلات بالحسبان يبدو للوهلة الأولى مسألة شائكة، إذ أن الكمون قدرة التفاعل البيني بين ذرتين v (r1-r2) لا تكون معقدة: إن هذه القدرة التجاذبية على مسافة طويلة (/r1 –r2/ > 0,5nm) تصبح متنافرة حين تقترب ذرتان من بعضهما بشكل يسمح لسُحبُهما الإلكترونية بالتلاقي. ومن حسن الحظ أنه ليس من الضروري، وفي حرارة منخفضة، أن نأخذ بالحسبان الشكل الدقيق لهذه القدرة من أجل وصف خصائص الغاز الذري. إن علاقة "هيزنبورغ" الشكلية تظهر لنا أن ذرة تكون مزاجية سيما وأن سرعتها معروفة جيداً. إن مقدار الإزاحة الكوانتية يعطى بطول الموجة الحرورية λ. وحين يصبح طول الموجة الحرورية أعلى من مدى القدرة، فيمكننا عندئذ تجاهل تفاصيل v (r1-r2) ووصف هذه القيمة بكمية واحدة تسمى طول الانتشار ولرمز إليها بــ a. وبشكل خاص فإن كونين (قدرتين) لهما طول الانتشار نفسه يتمتعان بتأثيرات فيزيائية متساوية في درجة حرارة منخفضة جداً.

وبذلك يمكننا استبدال الكمون الحقيقي v (r1-r2) بكمون أبسط بكثير:

$$vo(r1-r2)=\frac{4\pi\hbar^2 a}{m}\delta(r1-r2) \quad , (2)$$

حيث (r) تمثل توزيع ديراك.

يمكن أن يكون طول النشر إيجابياً للهيدروجين (a = 0,065) أو للرابيديوم (5,4 nm) أو سلبياً لليثيوم (-1,5 nm). في الحالة الأولى نقول إننا أمام تفاعل تأثيري نابذ، إذ أن ذلك يتطلب هدر طاقة لوضع ذرتين في مكان واحد في هذا الجو ذي الحرارة المنخفضة جداً. وفي الحالة العكسية، يُقال أن التفاعل جاذب. إنه لمن الصعب جداً حساب قيمة a، وبخاصة للعناصر الثقيلة مثل الرابيديوم، إذ يتطلب ذلك معرفة دقيقة جداً بالكمون البيني الذري الحقيقي. ولذا نلجأ في حساب ذلك للقياس التجريبي. ومن جهة أخرى، يمكننا الاستفادة من الحساسية الكبيرة جداً لقيمة a أمام الكمون البيني الحقيقي. وبتعديل هذا الكمون بشكل طفيف بوساطة ساحات مغناطيسية خارجية (إن ساحة مغناطيسية مقدارها يساوي أو يكبر بمرتين مقدار فخ مغناطيسي يقوم بالعمل) يمكننا تغيير a وحتى تغيير شارته. لذا يمكن استخدام زر للتعديل يحوّل غازاً نابذاً إلى غاز جاذب، مروراً بغاز شبه مثالي.

لنعد الآن إلى عدد N من الذرات الحبيسة في فخ متجانس تردده $\omega/(2\pi)$. ونستبدل في النظام الكمون الحقيقي بكمون التماس (2):

$$H=\sum_{i=1}^{n}\left\{-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta_i+\frac{1}{2}m\omega^2 r_i^2\right\}+\sum_{i,j(i<j)} vo(r_i-r_j) \qquad (3)$$

من جهة أخرى، وبافتراض أن النظام هو في درجة حرارة منخفضة جداً وبالتالي مكثف كلياً، يمكننا حساب قيمة الموجة بــ عدد N من الذرات $\Psi(r1,r2,\ldots,rn)$ بشكل بسيط جداً حيث كل ذرة تشغل الحالة نفسها ϕ:

$$\Psi(r1,r2,\ldots,rn) = \phi(r1)\,\phi(r2)\ldots\phi(rn)$$

إن تطور $\Psi(r1,\ldots,rn)$ يعطى عبر معادلة شرودنجر المطابقة للمعادلة (3)، مما يحدد التطور الزمني لــ ϕ (r,t):

$$i\hbar\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t}=-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\phi(r,t)+\frac{1}{2}m\omega^2 r^2\phi(r,t)+\frac{4\pi\hbar^2 a}{m}(N-1)/\phi(r,t)/^2\,\phi(r,t)$$

إن معادلة غروس بيتايفسكي هذه، والتي لها بنية معادلة شرودنجر مع حد غير خطي إضافي، هي قريبة من معادلة غينسبنورغ ــ لاندو المستخدمة في نظرية التوصيل من أجل إعطاء وصف لديناميكية أزواج كوبير. وهذه المعادلات تسمح بالتوضع على نظام مكروسكوبي (مليون من الذرات بالنسبة للمكثفات الغازية) مفاهيم كميّة متطورة بالنسبة للجزيئات الفردية: نشر حزمة ضوئية، تداخل بين الطرق الكمية، مستويات الطاقة. وهذا الانفتاح للفيزياء الكمية نحو العالم المكروسكوبي يقدم أيضاً إضاءة جديدة على أسس هذه النظرية. وهكذا فإن الصور في الأشكال 2-3-4 تشكل إجراء شبه آني للتوزع المكاني $/\phi(r,t)/^2$ (ر. تي) المشتركة مع وظيفة ϕ(ر. تي) في حين أن هذا التحديد في إطار الفيزياء الجزيئة يتطلب مبدئياً عدداً كبيراً من الإجراءات المتعاقبة التي تجري على أنظمة معدة جميعها ضمن إطار الحالة الأصلية نفسها.

ما أن نحصل مرةً على المكثف الغازي حتى يكون بمقدورنا التأثير فيه من خلال إجراء تعديل طفيف على القوة المغناطيسية التي ينحصر فيها. وعلى هذا النحو، نتمكن من بلوغ تردداته الصوتية التي مكننا مقارنتها مع الطيف الناتج عن قانون معادلة "شرودينجر" ذي الخصائص غير الشبيهة. وبهذا، فإنّ التطابق بين التنبؤ التجريدي المحض وبين الملاحظات يكون رائعاً، مما يحكم بصحة هذا الوصف للمكثف الغازي بمقتضى عمل موجة مماثلة بالنسبة لكل الذرات. هذا وتجدر الإشارة إلى أنه لمن الصعب جداً أن نعي حقيقة هذه الاهتزازات للمكثف الغازي ولنقاط ضعفها عندما يكون هذا الأخير معداً

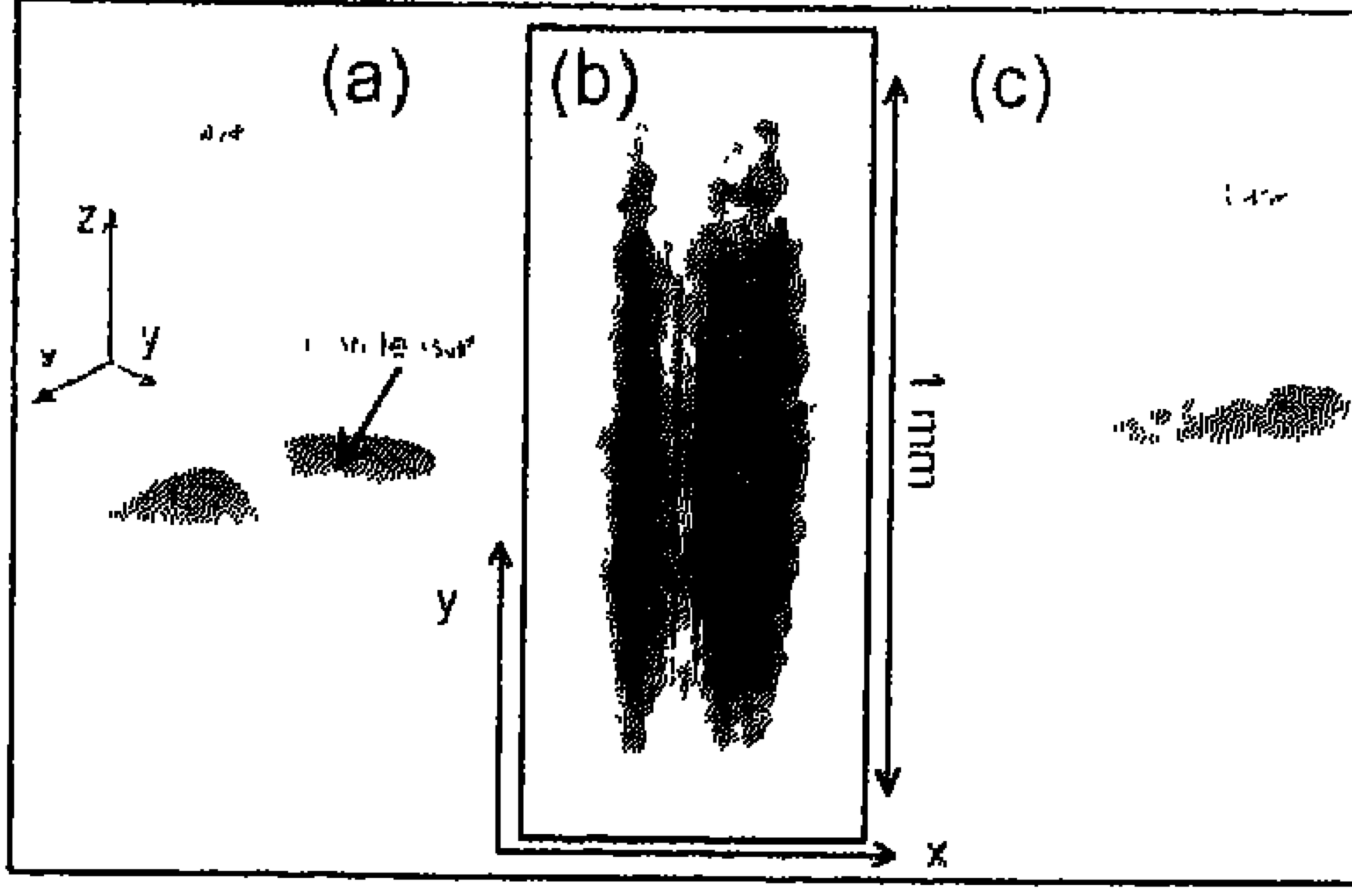
بوجود جزء غير مكثف ولكنه هام للغاية: ثمة مسائل مفتوحة لاتزال قائمة من أجل إدراك الإجراءات التي تمت بفضل درجة حرارة قريبة من درجة الحرارة الحاسمة.

التلاحم والتمييع الزائد:

إن تراكم أغلبية الذرات في حالة الكمية نفسها تعطي مكثفات (بوز ــ أينشتاين) خواصاً مذهلة من التلاحم فيما بينها. والمعادل الوحيد المعروف من قبل الجميع هو أشعة ليزر المؤلفة من عدد كبير من الفوتونات ضمن المجال الكهرومغناطيسي نفسه. وهذا التلاحم يتيح من الآن فصاعداً التطرق إلى المسائل الأساسية كتلك التي طرحها الأستاذ أندرسون منذ عشرين عاماً خلت: والسؤال هو هل يمكن لجسمين شديدي التمييع لم يسبق لهما أن تواجدا معاً، أن يكون لديهما حالة غير مطلقة محددة جيداً؟

إن الإجابة عن هذا السؤال الذي تم البحث فيه كثيراً على الصعيد النظري قد تمت من خلال إجراء تجربة تلاقي بين المكثفات الغازية أفضت إلى MIT. ومن خلال إلقاء الضوء على مركز الفخ المغناطيسي بواسطة سحابة ضوئية كما في الشكل A3 نستطيع أن نحصل على بئر مضاعف من الطاقة، إذ أن السحابة الضوئية تلعب دور الحاجز الرادع الذي يعيق من الناحية العملية أي مرور للذرات المكثفة بين الجزء الأيسر والجزء الأيمن. ويستطيع المرء أن يحضر من خلال التبخير مكثفاً غازياً في كل من هاتين المنطقتين، ومن ثم يقوم بقطع الطاقة المغناطيسية وكذلك الحاجز الضوئي. وبموجب ذلك ينتشر المكثفان الغازيان ويتلاءمان معاً، ونستطيع إذاً أخذ صورة عن التوزع المكاني للذرات (كما في الشكل 3 ب) وهذا التوزع يقدم لنا أهداباً متداخلة فيما بينها مع تباين واضح بنسبة 70%، الأمر الذي يؤكد على أن التلاحم غير المطلق للمصادر الذرية المشكلة من كل من هذين المكثفين الغازيين.

ولكي ندرك شكل التداخل بطريقة كمية، فيمكننا في هذه الحالة وصف كل واحد من هذين المكثفين الغازيين وكأنه مدى لموجة ذات هيولى كلاسيكية، مثلما نفعل ذلك في علم البصريات بالنسبة لحزمة ضوئية أحادية الطول الموجي. إن تطور هاتين الموجتين من الهيولى الكلاسيكية خلال الانتشار الذي يلي قطع الفخ قد ورد في معادلة "شورندينغر" التي حلت محل معادلة ماكسويل، هذه الأخيرة التي تقدم وصفاً لانتشار الأحزمة الضوئية. إن التوزع المكاني للذرات (لحظة الصورة 3ب) يتم من خلال إضافة أبعاد هاتين الموجتين، الأمر الذي يتيح لنا أن نشرح شكل التداخل الحاصل. ومع ذلك يجدر بنا الإشارة إلى أننا لا نستطيع مسبقاً أن نتنبأ عن موقع الهدب المركزي اللامع، لأن ذلك يتعلق بالمرحلة الأولية النسبية الموجودة بين المكثفين الغازيين، التي تتبدل من تجربة لأخرى: وإذا ما أعدنا هذه التجربة عدة مرات فإننا سنحصل خلال كل تجربة على منحى للتداخل مشابه لذلك الذي نشاهده في الصورة 3ب، لكن نظام الأهداب فيه سيكون حائداً بشكل محتمل. إن المعدل الوسط لكل هذه الأشكال بالتداخل سيؤدي هكذا إلى توزع ذري أحادي الشكل.



أ ــ نحن أمام بئر مضاعف من الطاقة، ولدينا في مركز الفخ المغناطيسي حزمة ضوئية ذات تواتر أعلى بكثير من تواتر الرنين الذري. وهذه الحزمة تخلق حاجزاً ذا طاقة كامنة يتيح الحصول بعد التبخير على مكثفين غازيين مستقلين.

ب ــ عندما نقطع الفخ المغناطيسي والحاجز الضوئي فإن كل مكثف غازي سينتشر ويمتد (كما في الشكل رقم 2).

ج ــ وفي منطقة التواصل بين مكثفين غازيين نلاحظ شكلاً من التداخل بين الموجات الهيولية. والتباين البارز بين أهداب التداخل هو نتيجة مباشرة لتراكم الذرات لكل مكثف غازي في الحالة الكمية نفسها.

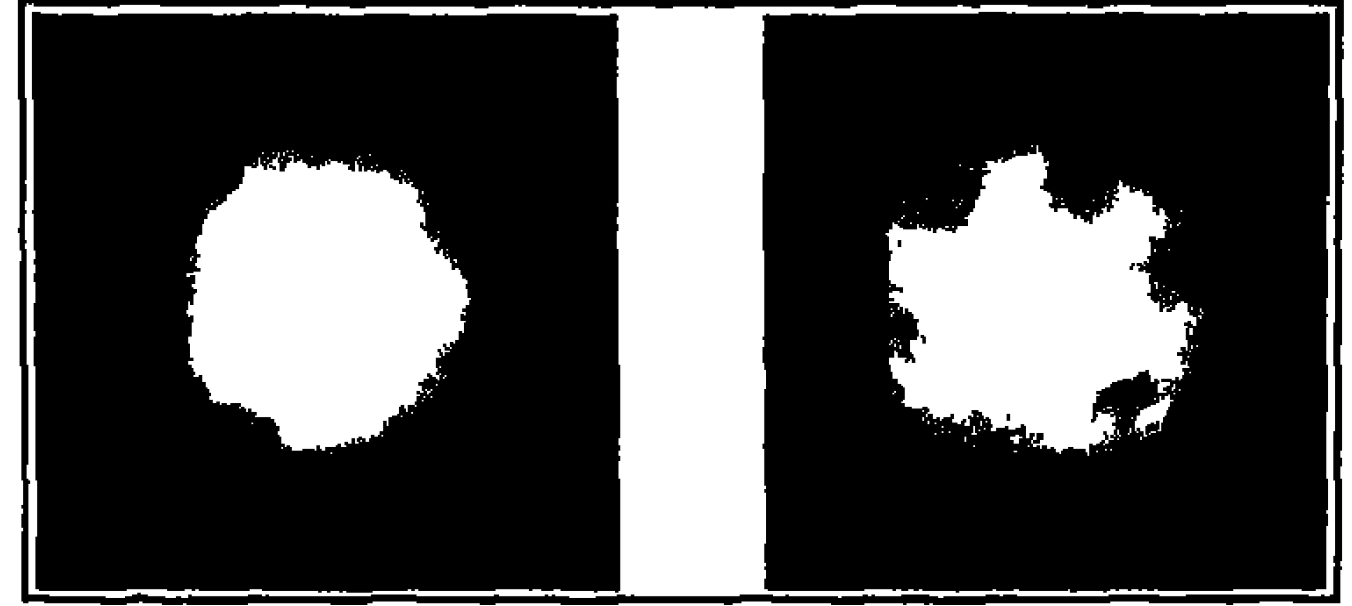
د ــ إن تعديلاً على العمل التجريبي يسمح لنا بمراقبة التمييع الزائد للمكثف الغازي وبمراقبة السرعة الحاسمة التي إذا ما ازدادت فإنها ستعمل على إخفاء هذا التمييع الزائد، وقد تمت هذه التجارب في مخبر MIT ضمن مجموعة كيتيرل.

وانطلاقاً من ترتيب مشاهد مصورة فوتوغرافياً لتجارب مماثلة، أكد طاقم MIT حديثاً على الطابع الفائق التميع لمكثف ما غازي. فالتمييع الزائد لوسط ما يتجدد من خلال هذه الواقعة التي تفيد بأن جسماً ما ذا سرعة خفيفة بما فيه الكفاية ينتقل فيه دون أية عائق وبدون أن يحدث تسخيناً في الوسط الذي ينتقل فيه. ففي تجربة MIT الجسم ليس سوى حزمة ليزر الضوئية. وباستطاعتنا أن نزيحه من طرف الفخ إلى طرف آخر وبسرعة محكمة، في هذه المرة يكون الإشعاع المحرقي للحزمة الضوئية أكثر صغراً من حجم المكثف الغازي المستعرض. وفي غضون ذلك نؤكد بأن درجة حرارة السحابة الذرية لا تزداد وترتفع في حال كانت سرعة العائق الليزري أقل من 0.3 حيث 7=6 مم في الثانية وهي سرعة الصوت في المكثف الذري. وهذا يثبت التمييع الزائد للمكثف الذري، ويعطي السرعة الحاسمة التي يتم في حال زيادتها اختفاء هذه الظاهرة. ولايزال المنظرون العاملون في هذا المجال يعملون من أجل شرح هذه العلاقة 0.3 بين السرعة الحاسمة وسرعة الصوت.

آفاق مستقبلية:

تحظى من الآن فصاعداً ثلاثون مجموعة في العالم بمكثفات غازية من نوع (بوز ــ أينشتاين) حيث يوجد منها اثنان في فرنسا، وفي دار المعلمين العليا (ENS) وفي معهد علم البصريات في بلدة

"أوريس" الفرنسية، ناهيك عن أعمال البحث في هذين النظامين قد تنوعت كثيراً خلال السنوات الأخيرة. وهناك توجه إلى إعداد دراسة تتعلق بدراسة المكثف الغازي (per se). بالإضافة إلى موضوع تمت مناقشته بشدة سواءً أكان على الصعيد النظري أو التطبيقي ويتعلق بوجود تيارات مستمرة بالإضافة على ضمن هذه الغازات التي هي النتاج المباشر لميوعتها الزائدة. وحديثاً برزت زوبعات كمية في مكثف غازي مؤلف من "الروبيد" يوم في مخبر كاستلر بروسيل التابع لمخبر دار المعلمين العليا (صورة رقم 4) حيث وضع الغاز في حالة دوران مع حزمة الليزر الضوئية التي تلعب دوراً مماثلاً لدور الملعقة التي نستخدمها من أجل تذويب السكر في قدح من الشاي. وفي حالة الدوران العالية بشكلٍ يفرق التواتر الحاسم، تبرز زوبعة أو عدة زوبعات ثم تستمر حتى ولئن أغلقنا عمل اللايزر. وهناك دراسات تجري الآن من أجل تفحص نووية هذه الزوبعات، وقياس مجال السرعة الذرية الملائم.



إذا قمنا بتحريك الغاز الذي بواسطة حزمة الليزر المنتشرة على طول المحور الكبير للسيجارة التي نجدها في الشكل 2 و أ، ب، فإن سنساعد على ظهور زوبعات كمية من المكثف الغازي، إن محور الزوبعة هو أيضاً موازٍ لمحور السيجار الكبير، ونستطيع ملاحظته من خلال تصوير السحابة الذرية وفقاً لهذا المحور وبعد توسع بالستي. وعلى هذا النحو، يبرز قلب الزوبعة وكأنه نقطة قائمة لأن الكثافة الذرية تناقصت بشدة على هذا الخط. إن الزوبعة الأولى كما في الصورة على اليسار قد تمت مراقبتها عندما تجاوزت سرعة دوران "الملعقة" الليزرية القيمة الحاسمة (من 100 هيرتز بالنسبة لهذه التجارب)، وبالنسبة لسرعات دوران أكثر زيادة، فإن ذلك يؤدي إلى ظهور شبكات الزوبعات (الصورة على اليمين).

وهذه الأنظمة تسمح أيضاً في إنجاز حلم المنظرين الذي كان سائداً طوال أعوام الستينات، والذي كان ينطوي على أن ننضد المكثفات الذرية المتنوعة المصادر فوق بعضها البعض. ومن أجل هذا نستخلص حقيقة مفادها: أن مستوى الطاقة الإلكترونية الأساسي لذرة روبيديوم أو لذرة صوديوم منقسم إلى شطرين بفضل التفاعل الدقيق بين الإلكترونيات والنواة. إن الباحثين في مركز (بولدير) أعدا خليطاً كمياً من المكثفات الغازية من خلال وضعهما في الفخ نفسه مجموعتين من ذرات الروبيديوم اللتين تتطابق كل واحدة منهما مع المستويين الدقيقين بحيث نستطيع أن نوصل بطريقة متجانسة بين هاتين المجموعتين بفضل موجة كهرومغناطيسية، مما يعطينا تماثلاً عميقاً مع قانون "جوزيفسون"، وهو قانون يتمثل بمزاوجة متلاحمة بين الموصلين الناقلين عبر اتصال عازل.

وبين المجالات المتعددة الممكنة من أجل وضع هذه المكثفات الغازية موضع التطبيق هناك مجال واحد يتمثل حتماً بجيل القذائف الذرية المتلاحمة والأحادية الشكل وذلك حتى نقوم مثلاً بتجارب ذرية مطبوعة على الحجارة. وانطلاقاً من مكثف ضاغط مفخخ مغناطيسياً فإننا نستخدم موجة إشعاعية للتبريد البخاري (مع شدة منخفضة جداً) من أجل استخلاص شبكة مستمرة من الذرات من مركز المكثف الضاغط. ثم نوجه هذه الذرات لكي تتوضع على سطح ما بطريقة تسمح لإنتاج حافز ما. وهنا نحصل على تسديد رمي الذرات بشكل تام. وهذا الرمي يبلغ حد المعادلة القائمة على عدم المساواة التي وضعها هايزنبرغ. في الواقع إنها أداة دقيقة بالنسبة لهذه التجارب. البعض يتحدث عن "ليزر ذي ذرات" للإشارة إلى هذا النمط من الرشق الذري المنبثق عن مكثف غازي. وهذه الرشقات لديها في الحقيقة خواص الالتحام المعترض أو الطولاني القريبة جداً من الحزمات الليزرية الضوئية. ولسوء الحظ فإن تدفق الذرات الناجمة عن تجربة التكثف الغازي لايزال بعد ضعيفاً جداً: ومع وجود مليون من الذرات في المكثف الغازي ونسبة تكرارية لبعض الرشقات في الدقيقة الواحدة، يلزمنا 30 عاماً لكي نضع طبقة ذرية فوق سطح مساحته 1/سم². إن إحدى طرائق البحث الحالية ترمي إذاً إلى تحسين هذا التدفق بشكل ملحوظ. وهناك موضوع آخر يتعلق بالأبحاث يهدف إلى تعميم ظاهرة التكثيف الغازي على منظومات أخرى، مثل الجزيئات المتعددة الذرات. وحتى إذا بقي تبريد مثل هذه الأجسام يتم بمهارة فائقة وخطرة، فإن الآفاق المفتوحة بواسطة هذه الأبحاث هي جذابة وساحرة من خلال الجسر الذي يمكن إقامته بين بنية المواد في غاية الضخامة المتمثلة بالبنى الذرية وبين التلاحم الكمي المجهري الذي تتصف بها مكثفات بوز ــ آينشتاين.

المراجع:

1- بايس.آ: «ألبرت آينشتاين، الحياة والمؤلفات، دار النشر: انترايديسيون، لعام 1993.

2- نوزيير. ب وبنس.د: «نظرية السوائل الكميّة، مجلد رقم 2، دار النشر اديسون ويسلي، لعام 1990.

3- كاستان. أي و دوم. ر دسيناترا: «مكثفات بوز الغازية»، دار النشر عالم الفيزياء، آب 1999.

4- دالفوفو (اف) وجيورجيني. أي و بتيافسكي أي: «نظرية بوز ــ آينشتاين»، مجلد رقم 7، لعام 1999.

5- كوهين تانوجي «دروس معطاة في معهد فرنسا» بين أعوام 1996-2000.

6- اينجوشيو. م. و سترينجاري. أي، و فيمان C.F: «مكثفات بوز ــ آينشتاين الغازية» محاضرات ألفيت في المعهد الدولي لعلوم الفيزياء. أمستردام، لعام 1999.



... الثقوب السوداء

سوف تلقي بها أمواج ثقالية خارج المجرات نحو أعماق الفضاء السحيق

بقلم: ستيف ناديس

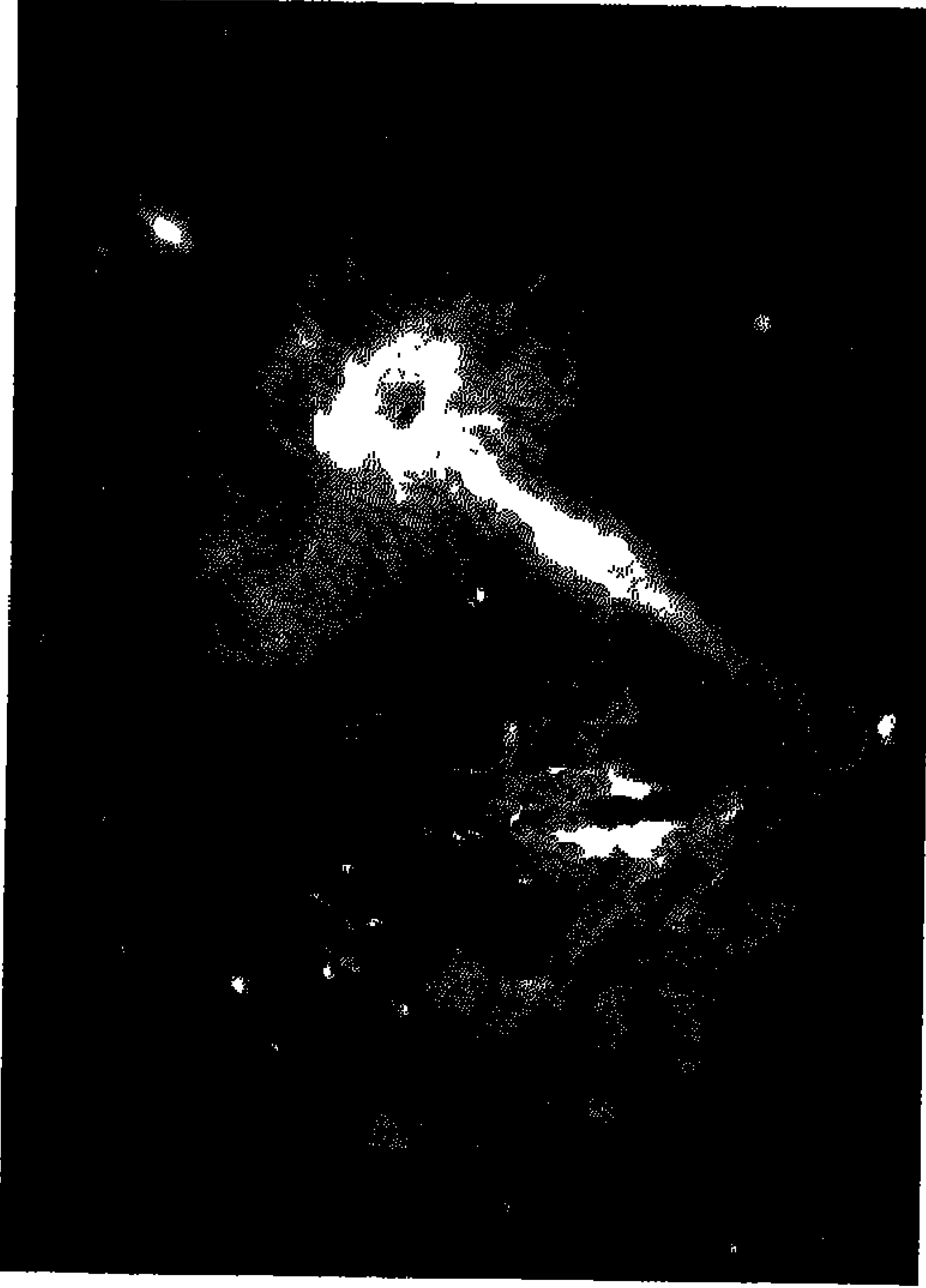
قد تكون واحدةً من أعنف الاصطدامات في الكون تلك «الركلة» التي تحدث عندما يقترب ثقبان أسودان حلزونيان واحدهما من الآخر حتى يلتحمان في ثقب واحد أسود، لا يلبث أن ينطلق بعيداً عن مركز المجرة، وقد ينطلق بعيداً عن المجرة ذاتها، بتأثير قوى هائلة تسببها أمواج ثقالية.

كان آنشتاين قد توقّع في مستهلّ القرن العشرين أن تولّد النجوم السريعة الدوران «أمواجاً ثقالية»، دون أن يتسنّى له التحقّق من الأمر في حينه. تصدر هذه الأمواج عن ثقبين أسودين يتجهان نحو التصادم وفي المرحلة التي تسبق اندماجهما في ثقب واحد. وقد تكون هذه الأمواج غير متناظرة، لذلك فهي «تركل» الثقب الناتج عن الاندماج، وتدفعه بعيداً عن مركز المجرّة.

يقوم علماء الفلك، منذ أكثر من عقدين، بدراسة هذا التأثير الذي لم يُختبر تجريبياً حتى الآن؛ وقد بلغ الاهتمام به مداه سنة 2004 مع نشر بحث يتضمن أكثر الحسابات تفصيلاً عن السرعات الانحسارية[1] من قبل فريق عمل يضم كلاً من مارك فافاتا من جامعة كورنل في إيتاكا – نيويورك، وسكوت هيوز من معهد ماساشوستس للتكنولوجيا، ودانيال هولز من جامعة شيكاغو (ويعمل الآن في المخبر الوطني في لوس ألاموس).دفع هذا البحث عند نشره في مجلة «فيزياء الفلك» العديد من الباحثين لدراسة الركلات التي تتعرض لها الثقوب السوداء. ويحاول الباحثون اليوم إعادة تقدير تلك السرعات على نحو أكثر دقة بغية معرفة مصير الثقوب السوداء المبعدة عن لبّ المجرّة، وإن كانت هذه الظاهرة تؤثر على تشكّل ثقوب سوداء فائقة الكتلة وأثقل من شمسنا بمليون مرّة أو حتى ببليون مرّة.

كيف يُر كل ثقب أسود:

كشف البرنامج سلون لمسح الفضاء كوزرات[2] تشكلت في مراحل مبكّرة من عمر الكون. وهي ثقوب سوداء تُصدر نفثات هائلة من المادة بسرعات كبيرة جداً. وجَهَدَ علماء الفيزياء النظرية لتفسير كيفية تشكّل ثقب أسود تزيد كتلته بليون مرة عن كتلة الشمس، قبل أن يبلغ عمر الكون 900 مليون سنة، وهو عمر أقدم الكوزرات. وزاد الأمرَ تعقيداً الركلاتُ التي تتعرض لها الثقوب السوداء.



تبثّ الثقوب السوداء عند اندماجها في لحظات اصطدامها الأخيرة، إشعاعات ثقالية، تركل بقوتها الصاروخية الثقب الأسود الفائق الكتلة الناتج عن عملية الاصطدام، وتقذفه نحو خارج مركز المجرّة في رحلة لا عودة له منها.

يدرك باحثو فيزياء الفلك أن بنية الكون تنمو في سياق هرمي تندمج فيه وحدات بنيوية صغيرة بعضها ببعض لتشكل وحدات بنيوية أكبر. فإن كانت الثقوب السوداء تنمو بمثل هذا الاندماج، وتتلقّى الركلات من جرّائه، فكيف تأتّى أن يكون لها، وبمثل تلك السرعة، قوام هائل عملاق مثل قوام الكوازر المكتشفة؟ وهل تكبر هذه الثقوب بالاندماج حقاً، أم تفعل ذلك بالتنامي متغذّية بالغازات والنجوم التي تقع في نطاق جاذبيّتها؟

---

(1) وهي سرعة أي جرم سماوي بعيداً عن الشمس

(2) وهي أشباه نجوم من أشد الأجرام المعروفة سطوعاً وأكثرها بُعداً عنّا.

سرعتهما المدارية، ويبدأ تأثير أمواجهما الثقالية التي تحمل بعيداً المزيد من طاقة الجملة. تتسارع هذه العملية وتبلغ ذروتها باصطدام الثقبين الأسودين واندماجهما في ثقب واحد.

وقبل الاصطدام مباشرة، فإن الفروق الكائنة بين إصدارات أمواجهما الثقالية، الناتجة عن تباين كتلتيهما وعزمَي دورانهما، تؤدي إلى ظاهرة الانحسار النهائي الذي لا تتجاوز سرعته وفقاً لحسابات فاقاتا وفريقه 310 أميال في الثانية (500 كم/ثا).

يتوقف ما يحدث بعد ذلك على شدّة الركلات وعلى كتلة المجرّة المضيفة. فالمجرات التي تشكلت في مراحل مبكّرة من عمر الكون تترابط ثقالياً بقوى ضعيفة، وتكون سرعة إفلاتها[4] (وهي سرعة الإفلات منها) من مرتبة 6 أميال في الثانية (10 كم/ثا)، تبعاً لحسابات هيوز. وتزداد قوة جذب المجرّات القزمة وتزداد بالتالي سرعة الإفلات منها فتبلغ بضع مئات من الأميال في الثانية، في حين تتراوح هذه السرعة في المجرّات الأكبر كمجرّة درب التبّانة ما بين 310 و 930 ميل في الثانية (500-1500 كم/ثا). لذلك عندما تكون سرعة الانحسار أكبر من سرعة إفلات المجرّة، فإن قوة الجذب الثقالي التي تؤثر بها هذه الأخيرة لا تعود كافية لاستبقاء الثقب السود فيها.

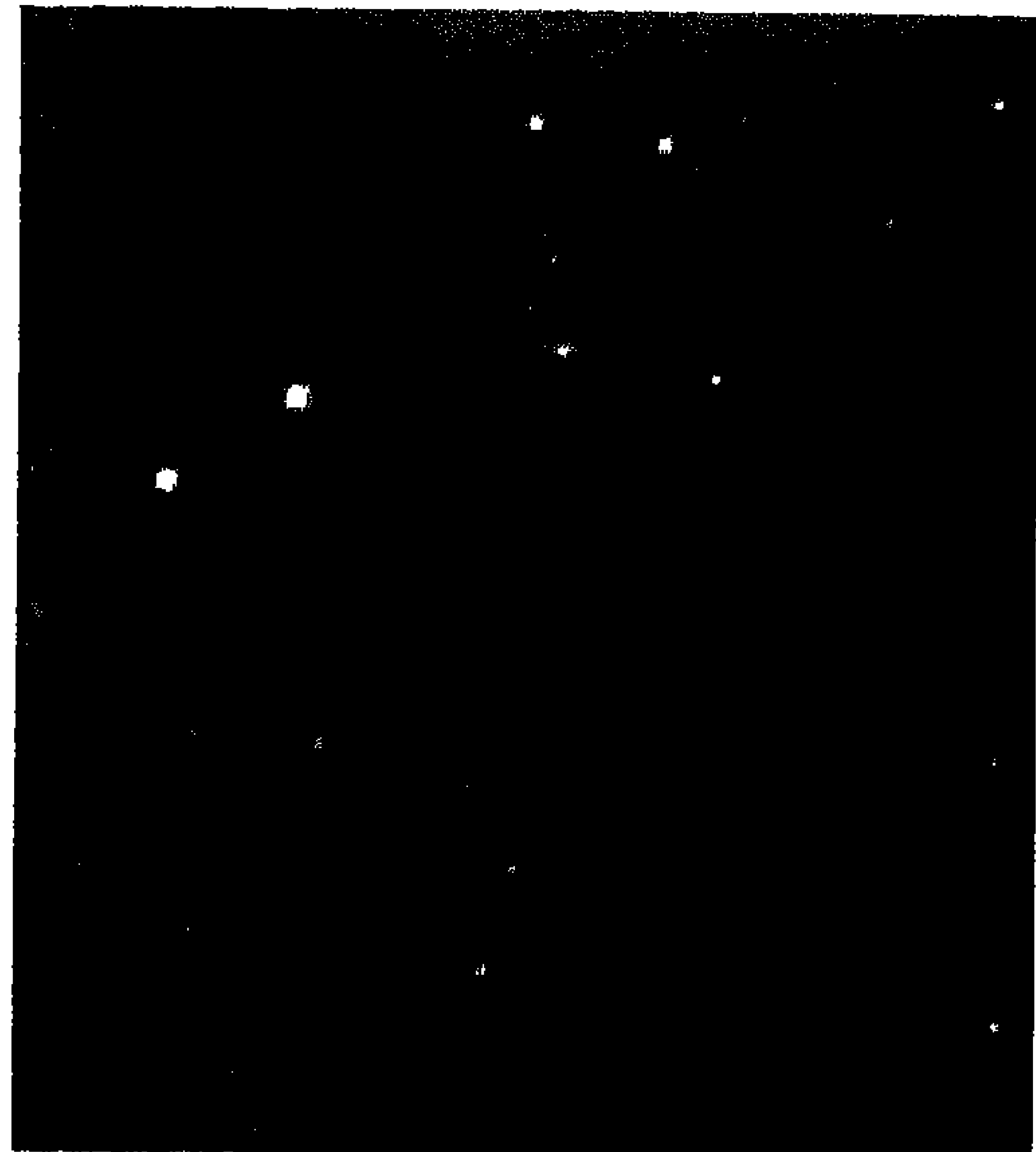
يسير الثقب بعد مغادرته المجرّة بسرعة تقدّر بحوالي 190 ميل في الثانية (300 كم/ثا)، كما يقول بييرو ماداو من جامعة كاليفورنيا. وقد يلتقي «ثقوباً سوداء تائهة أخرى» تستعصي على الكشف «إن لم تكن أقراص تناميها[5] مشعّة، إذ تصعب معرفة أين نبحث عنها»، كما يقول ماداو. كما أن التكنولوجيا الحديثة لم تتطوّر بعد على نحو يتيح رؤية الثقوب السوداء بواسطة عدسات ثقالية، تُعدّ السبيل الوحيد لكشفها.

إن مفهوم ثقوب سوداء غير مرتبطة تتساق في الفضاء بين المجرّات، دون وجود ما يدلّ عليها، أمر محيّر؛ فهو يعني، كما يقول ماداو، «أن تعداد الثقوب السوداء غير مكتمل، إذ لا يتم إحصاء كل الثقوب الضخمة في الكون، لأننا لا نرى إلاّ ما يشعّ منها».

عدد الثقوب السوداء: غير معروف!

قد تنمو الثقوب السوداء خلسة بابتلاع مادة دون إصدار إشعاع، كما يقول الباحث في فيزياء الفلك ميتشل بيغلمان من جامعة كولورادو. «لذلك لا يمكن استبعاد إمكانية أن تكون كتلة الثقوب السوداء خارج المجرّات أكبر من كتلتها في داخلها».

إن عدم ارتباط بعض الثقوب السوداء بمجرّة ما لا يعني بالضرورة فقدانها إلى الأبد. وقد وجد آني لوب من جامعة هارفرد



يحتاج الضوء الخافت الصادر عن خط الانزياح الأحمر 4.15 للكوزرات (الذي يدل عليه السهم) إلى أقل بقليل من 12,5 بليون سنة ليصل إلينا ونراه. يبدو في الصورة الكوزرات عندما كان عمر الكون 1.5 بليون سنة فقط ويدرك علماء الفيزياء اليوم كيف بلغت الثقوب السوداء الفائقة الكتلة التي تغذي الكوزرات هذه الدرجة من الكبر في مرحلة مبكّرة من عمر الكون.

يقول مارتن ريز، عالم الفلك في جامعة كامبردج:«إن الأمر متوقف كلّه على شدّة الركلات التي تتعرّض لها».

ويبحث العلماءُ اليومَ عن ثقوب سوداء ثنائية (وهي ثقوب مزدوجة يدور الواحد منها حول الآخر، محسوكين بتأثير قوة الجاذبية المتبادلة بينهما). وقد تمكّنوا حتى الآن من رصد ثقبين أسودين في المجرّة ذاتها، إلاّ أن المسافة التي تفصل بينهما لا تسمح بدوران واحدهما حول الآخر؛ كما أظهرت دلالات غير مباشرة وجودَ ثقوب سوداء ثنائية. يقول هيوز: «غالباً ما تحوي كل المجرات ثقوباً سوداء، وتندمج هذه المجرات بعضها ببعض وبخاصة قبل حوالي بليوني سنة»، لذلك فإن من المنطقي القول بتشكّل الثنائيّات رغم صعوبة رؤيتها «ذلك أننا نتحدث عن جسمين على درجة كبيرة جداً من الصغر، يفصل واحدهما عن الآخر فرسخ فلكي (بارسك)[3]».

لا تتيح هذه المسافة الهائلة الفاصلة بين الثقبين الأسودين إمكانية توليد أمواج ثقاليّة مؤثّرة. أمّا إن كانت الثنائيّة محاطة بحشد من النجوم فإن التأثيرات المتبادلة بين هذين النوعين قد تلقي النجوم بعيداً عن هذا الجوار، ممّا يستنفد معظم طاقة الجملة ويسمح باقتراب أحد الثقبين الأسودين من الآخر. ومع هذا الاقتراب تزداد

---

[3] الفرسخ الفلكي، أو البارسك، هو واحدة قياس للمسافة تعادل 3.26 سنة ضوئية تقريباً، أي حوالي 3.09×10^{13} كم.

[4] وهي السرعة التي تحتاجها كتلة ما كي تنجو من الانجذاب نحو جسم آخر بسبب ثقالته.

[5] وهي أقراص شبه منبسطة من الغاز أو المادة تدور في فلك الثقب الأسود بفعل الثقالة. ويُعدّ الإشعاع الصادر عن الغاز الحارّ في هذه الأقراص دليلاً على وجود الثقوب السوداء.

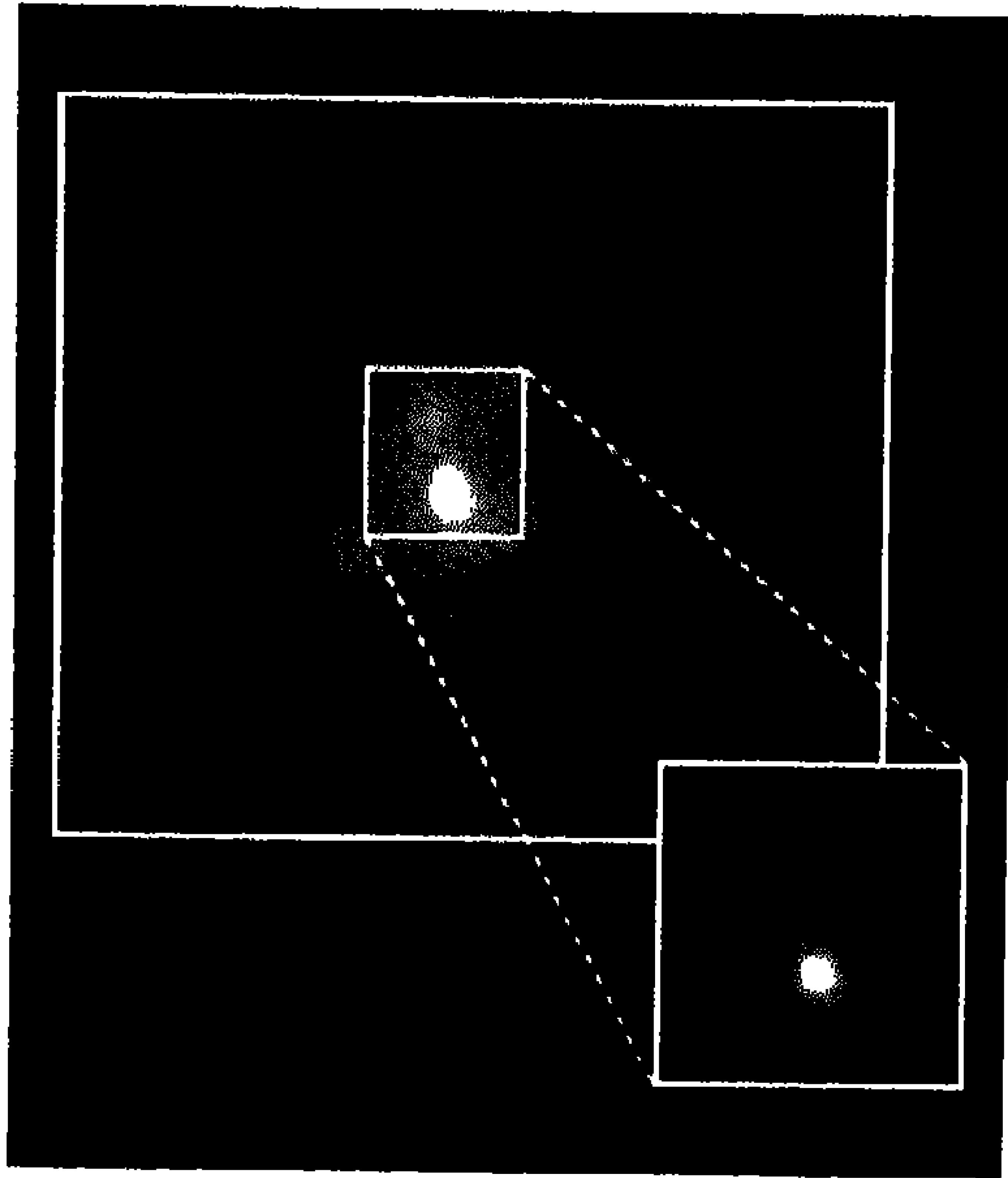
وستيورات ويث من جامعة ملبورن، في تحليل أجرياه، ان الثقوب السوداء التي قُذف بها إلى خارج مجرّة صغيرة، قد ترتبط بجملة أكثر تثاقلاً وجاذبية ممّا يؤدّي إلى تشكّل مجرّة أكبر، كما لو أن «قدر المجرّات الصغيرة المحتشدة منذ المراحل المبكرّة من عمر الكون أن تندمج في مجرّة أكبر»، يقول لوب لذلك «وحتى إذا ما أبعد ثقب أسود عن مجرّة صغيرة، فإنه يظلّ داخل اللعبة».

وقد قادت عملية تمثيل حاسوبي أجراها كلٌ من توم آبل من جامعة ستانفورد وميروسلاف فيسيش وستين سيغاردسون من جامعة بنسلفانيا الحكومية إلى النتيجة ذاتها، إذ ابتدأوا بتمثيل ثلاثة آلاف هالة[6] تحوي مادة خفيّة[7]، في كل واحدة منها ثقب أسود مركزي صغير، وراقبوها وهي تتبادل التأثيرات فيما بينها من خط الانزياح الأحمر 8 (الموافق لحوالي 600 مليون سنة بعد الانفجار الأعظم) إلى خط الانزياح الأحمر 1 (الموافق لحوالي 5 بليون سنة بعد ذلك)، فلاحظوا أن «معظم الثقوب السوداء قد أبعدت عن هالاتها»، إلاّ أن المطاف انتهى بمعظمها نحو مجرّة أخرى. ويتابع آبل فيقول «قد تكون رحلة الإبعاد مرحلة مشتركة في حياة الثقب الأسود، إذ قد يصبح بعدها جزءاً من ثقب أسود عملاق».

تكون رحلة ثقب أسود أُبعد بلطف عن مركز مجرّة أقلّ إثارة، فهو يعود بعد ركلة خفيفة (أو وكْزة) إلى نواة مجرّة كبيرة بعد حوالي مائتي مليون سنة يقوم خلالها بعدة دورات مدارية. كما يقول ديفيد ميريث من معهد روشستر للتكنولوجيا.

لمّا إذا قُذف ثقب صغير بقوة نحو حافة مجرّة قزمة فقد يظل «يدور حولها إلى الأبد». كما يقول آبل. تتباطأ حركة الثقب الأسود بتأثير قوة التجاذب التي تشدّه بها النجوم، وهو ما يعرف «بالاحتكاك الديناميكي»؛ وقد يغور، عندما يفقد عزمه الزاوي، نحو مركز المجرّة. إلاّ أن الاحتكاك الديناميكي لا يكون فعّالاً في هالة انتثار فيها القليل من المواد الكابحة. وقد بيّنت عملية الحساب التمثيلي التي أجراها آبل وزملاؤه أن عدداً من الثقوب السوداء أقل بعشرين مرّة يتوجّه نحو مركز المجرّة عندما تتراوح سرعة الركل ما بين 80-170 ميل في الثانية (125-275 كم/ثا) بدلاً من 0-90 ميل في الثانية (0-150 كم/ثا)، وتكون النتيجة مجموعة من الثقوب السوداء الجانحة في هالة المجرّة.

وسوف يقدّم التوصّل إلى دلالات على إبعاد الثقوب السوداء، الدليلَ الأقوى الذي يدعم مفهوم الركلات. «إلاّ أنّ ذلك لن يكون أمراً سهلاً إذ يصعب تحديد موقع الثقب الأسود حتى لو علمنا أين علينا أن نتطلّع» كما يقول ميريث. أمّا عالم الفلك إليوت كواتريت من جامعة كاليفورنيا فيقول إنّ الجزء المحيّر في الأمر هو تحديد موقع مركز المجرّة عند تبدّل موقع نواتها الفعّالة لأن «تحديد هذا المركز يتم عادة من خلال رؤية الضوء الساطع للكوازرات».



يبدو ثقبان أسودان فائقا الكتلة في مركز القزم NGC 6240 ناتجان عن اصطدام مجرّتين صغيرتين؛ وهما ثقبان نشيطان كما تدلّ الإشعاعات السينية الصادرة عنهما والتي تمت ملاحظتها في مرصد شاندرا للأشعة السينيّة. ورغم أنها على مسافة تقرب من 3000 سنة ضوئية واحدهما من الآخر، فإنهما سوف يندمجان بعد بضع مئات من ملايين السنين.

تتضمن إحدى الطرق الممكنة لكشف ثقب أسود مُبعَد كشفَ ملاحظات راديوية لنفثات من المواد المتدفقة منه (وهي تتدفق في الواقع من قرص تناميه). فعند ركل ثقب أسود وإبعاده، يتعرض مسار نفثه إلى الانحناء خلال حوالي مليون سنة. وتكمن المسألة هنا كما يقول كواتريت بوجود أسباب أخرى قد تؤدي إلى هذا الانحناء، كأن يرتطم النفْث المادي بكتل غازية أثناء مسيره، لذلك «يصعب عزوُ الانحناء إلى تأثير الركلة فقط».

ضياع ثقوب سوداء:

يشير ميريث إلى بعض البراهين الظرفيّة المحيّرة الدّالّة على حدوث الركلات فيقول: «عندما نتطلّع إلى مجرّات صغيرة جداً، فإن هناك نقطة نتوقف عندها عن رؤية الثقوب السوداء». يحدث هذا التوقف عندما تنخفض سرعة إفلات المجرّة إلى حوالي 125 ميل في الثانية (200 كم/ثا). «وهو ما يتوافق تماماً وتقدير شدّة الركلات». ويتساءل: «هل أن في هذه المجرّات الصغيرة ثقوباً سوداء عصيّة على الكشف، أم أنها وُجدت فيها سابقاً ثم قُذفت بعيداً عنها؟».

تكمن إحدى طرق الإجابة عن هذا التساؤل بمسح المجرّات القزمة. لذلك قام ميريث وزملاءه بدراسة قزمين جارين هما M32 و MGC 205 في المجموعة الموضعيّة[8]، فلاحظوا توفّر دلالات قويّة

[6] وهي المنطقة شبه الكروية المحيطة بالمجرّات الحلزونيّة. وقد تحوي الهالة أيضاً على قدر كبير من المادة الخفيّة.

[7] وهي مادة لا يصدر عنها أيّ إشعاع يمكن كشفه، ويُستدلّ على وجودها بفضل قوى الجذب الثقالي التي تؤثر بها في الأجرام الأخرى.

[8] وهي مجموعة المجرّات التي يقارب عددها ثلاثين مجرّة، والتي تنتمي إليها مجرّة درب التبّانة.

على وجود ثقب أسود في القزم M32، في حين أن ما توفر من دلالات عن القزم الآخر لم يكن مقنعاً. يقول ميريث: «تبلغ سرعة إفلات M32 حوالي 400 كم/ثا، وهي سرعة يصعب معها أن نأمل بإمكانية إبعاد ثقب أسود عنه، لذلك فإن هذا الإبعاد لم يحصل على ما يبدو».

كانت المجرة القزمة M32 هي الوحيدة التي خلص علماء الفلك إلى القول بوجود ثقب أسود مركزي فيها! ويتحسر ميريث لعدم مقدرة هؤلاء على ملاحظة أقزام في مجموعة المجرّات التالية الأقرب، ممّا يعني ضآلة العينة التي يتعاملون معها لمعرفة عدد الثقوب السوداء المبعدة.

دعم حادثة الهيجان:

قد يساعد فهم ظاهرة قذف الثقب الأسود علماء فيزياء الفلك، كما يقول فالثا، على معرفة كيفية نموّ الثقوب السوداء العملاقة وطريقة هذا النمو، إن بالاندماج أم بالتنامي. فركْل الثقب، أو قذفه، ليس في صالح النمو بالاندماج. يقول ستيوارت شابيرو، عالم الفيزياء الفلكية في جامعة إيلينوي: «إن الاندماج، مع إمكانية حدوثه، ليس الطريقة الرئيسية في نمو الثقوب السوداء»؛ ويسود الاعتقاد اليوم أن معظم هذا النمو يتم بطريقة التنامي.

مصطلحات فلكية:

نواة مجرّة نشطة: اللّب الفعّال لبعض المجرّات.

العزم الزاوي: الطاقة الناتجة عن حركة جسم يدور حول ذاته. تتوقف قيمته على كتلة الجسم ونصف قطر دورانه وسرعة تفّه الذاتي.

المادة الخفيّة: هي مادة غير مرئية، يمكن الاستدلال عليها من خلال تأثيراتها الثقالية؛ وهي تشكّل حوالي 27% من مادة الكون كلها في الوقت الحاضر.

حدّ إدينغتون: حدّ للسرعة تتساوى فيه قوة إشعاع ثقب أسود مع قوة ثقالته. سميت باسم عالم فيزياء الفلك البريطاني السير آرثر إدينغتون.

معادلات حقل أينشتاين: معادلات تصف كيف تبدّلُ المادةُ والطاقة هندسةَ الزمكان، وهي جزء من نظرية النسبية العامة لأينشتاين.

التثاقل العدسي: هو تشوّه أو انحناء الضوء الصادر عن جسم ما بسبب وجود جسم آخر ذي كتلة كبيرة بينه والأرض.

الثقوب السوداء فائقة الكتلة: ثقوب سوداء تزيد كتلتها ملايين أو بلايين المرات على كتلة الشمس. يبلغ أفقُ حدثها قياسَ نظامنا الشمسي.

1

تتحرك الثقوب السوداء في عباب الركلات التي قد تتعرض إليها نحو المنطقة من الفضاء ذات الكثافة الأكبر مندمجة في ثقب فائق الكتلة لا تستطيع معظم الثقوب

2

السوداء التي تتعرض لركلات بسرعة 47 ميلاً في الثانية (75 كم/ثا) الإفلات من الحقل الثقالي لمجرّاتها، لذا فهي تتبع المسار ذاته الذي كانت تسلكه عند عدم تعرضها لركلات.

3

عندما تتجاوز شدة الركلات 125 ميلاً في الثانية (200 كم/ثا)، يتغلّب العديد من الثقوب السوداء على قوة الجذب الثقالي لمجرّاتها المضيفة، فتفلت هاربة منها

والتنامي عملية أسّيّة. فالثقب الأسود يشدّ الغازات إليه بجاذبيته؛ ومع تزايد كتلته تزداد سرعة نموّه وتضخّمه، إلاّ أن هناك حداً أقصى لهذه السرعة «يعرف بحد إدينغتون»، لا تستطيع تخطّيه سرعة سقوط المادة في الثقب الأسود، لأن الإشعاعات الصادرة عنه تدفعها بعيداً عنه. ويكون بوسع ثقب أسود، تبعاً لمردود تحول المادة إلى طاقة فيه، مضاعفة كتلته مرّة كل أربعين مليون سنة، متضخّماً بالسرعة التي يسمح له بها حدّ إدينغتون.

ومع أن «النمو الأسّيّ» هو أسرع نموّ نعرفه، إلاّ أن سرعته قد لا تكون كافية لنمو ثقب أسود، كما يقول زلطان هايمان من جامعة كولومبيا، إذ قد تأتي بداية هذا النمو متأخرة بسبب ما يتعرض له الثقب من ركلات وقذف. لذلك فهو يحتاج إلى نموّ مفاجئ أسرع يعرف «بتنامي إدينغتون الفائق» يتخطى فيه الثقب حدّ إدينغتون ويلتفّ عليه بجرّ الغاز إليه من أحد الاتجاهات وبثّ إشعاعاته في اتجاه آخر.

لكن هايمان وآخرين يرون غير ذلك. ففي الأزمنة المبكرة عندما كانت مخاطر القذف أكبر كانت الثقوب السوداء نادرة. يقول هايمان: «لو أن الدنيا مئة مجرّة مجهرية في واحدة منها فقط ثقب أسود، لأمكن دمجها دون أن تتعرض لأيّ ركْلٍ لعدم وجود ثقوب سوداء فيها، وسوف تتشكل في النهاية مجرّة كبيرة فيها ثقب أسود. وعندما تندمج هذه الأخيرة مع مقابلة لها تحمل ثقباً أسود أيضاً، فإن المجرّة الجديدة تكون على درجة من الكبر تحتفظ معها بثقبها الأسود. ويضيف كولتريت قائلاً: «وعلى مثل هذا النحو يمكن أن نبدأ بثقوب سوداء نادرة في المجرات الصغيرة والمجرّات الوليدة ونصل في النهاية إلى ثقوب سوداء في كل مجرّة كبيرة».

رقصة الثقب الأسود:

يقدم هايمان عدة فرضيّات لتفسير ندرة الثقوب السوداء في الفترة المبكّرة من عمر الكون. تعزو إحدى الفرضيّات هذه الندرة إلى أن معظم المجرّات الصغيرة تدور حول نفسها بسرعات كبيرة

يمكن نمذجة ركلات الثقب الأسود حاسوبياً. وقد وجد فريق آبل وميروسلاف ميميس وستين سيغوردسن في التماثلات التي أجروها أن مئات من الثقوب السوداء البدائية تعيش داخل هالات من مادة خفية. تظهر الصور مسارات ثقب أسود عبر بلايين السنين (اللون الأبيض) من خط الانزياح الأحمر 8,1، عندما كان عمر الكون 600 مليون سنة، إلى خط الانزياح الأحمر 1، عندما أصبح هذا العمر 6,5 بليون سنة، وذلك بدلالة الفروق الكائنة بين سرعاتها البدائية. يدل اللون الأصفر على مناطق الكثافات المرتفعة واللون الأزرق على مناطق الكثافات المتوسطة واللون الأحمر على مناطق الكثافات المنخفضة.

جداً يتعذّر معها على غازاتها أن تتكاثف، ويتعذّر بالتالي تشكّل ثقوب سوداء ونجوم. وتعزو فرضيّة ثانية هذه الندرة إلى التغذية الجزيئية الراجعة، حيث تبثُّ الكوازرات البدائية إشعاعات مؤيّنة تحطم الهيدروجين الجزيئي في جوارها (يمتص هذا الهيدروجين الحرارة فيبرّد الغازات متيحاً تشكل ثقوب سوداء).

وقد تساعد نتائج التجارب التي يمكن إجراؤها على معرفة الفرضية الصواب من بين هاتين الفرضيّتين كما يقول هايمان.

ويبقى السؤال عن كيفية تشكّل الثقوب السوداء الفائقة الكتلة لغزاً محيّراً لا تبدو في الأفق القريب أية حلول تجريبية قد تساعد على حلّه. وكل ما يمكننا قوله في الوقت الحاضر هو ما يقوله جوردي ميرالدا إيسكودي من معهد الدراسات الفضائية في كاتالونيا: «إن الثقوب السوداء موجودة». فهي لم تقذف كلها خارج المجرّات المبكّرة، «وقد يكون بعضها قد قذف في تلك المرحلة، إلاّ أن بعضها لا يزال موجوداً، ولا تزال العملية مستمرة».

ويرى ميريث إمكانية تقديم العديد من النماذج بسبب عدم الدقة في تقدير سرعة الركلات، ويقول: «ما أريده من هيوز هو إجراء حسابات أكثر تفصيلاً لهذه السرعة»، وهو ما يخطط هيوز وفالثا لإجرائه. يقول هيوز: «هناك حتى الآن عدم دقة في تحديد أرقامنا بمقدار الضعف»، ولسوء الحظ فإن مثل هذا الخطأ أكبر من أن يسمح بتفسير إمكانية هروب ثقب أسود من مجرّة أو عدمه.

عالج هيوز وفريقه في مشاهدهم الأوّلية المرحلة البطيئة للاندماج على نحو جيد. غير أنه يستدرك فيقول: «إلاّ أن مقدرتنا على نمذجة نظام لم تكن كذلك عند اقتراب ثقبين واحدهما من الآخر». ويأمل في تحسين دقة حساباته في المرحلة القادمة وذلك بمعالجة مرحلة الغوص الأخيرة بصورة أكثر واقعية.

أما فريق بروتزفيل في جامعة تكساس، الذي يرأسه مانويلا كامبانللي وكارلوس لوستو، فيعتمد تقارباً متمّماً لتقارب فريق فالثا، إذ بدأ بثقبين أسودين بحجمين متقاربين (نسبة كتلتيهما 1:2)، بخلاف فريق فالثا الذي اختار لتسهيل حساباته ثقباً أسود بقياس اعتيادي ومرافقاً صغيراً جداً له. كما ركّز فريق كامبانللي كلّيّة على مرحلة الغطس إذ اعتمد في نموذجه ثقبين أسودين يفصل واحدهما عن الآخر بضع مئات من الأميال فقط. كانت حدود الخطأ كبيرة أيضاً عند هذا الفريق كما كانت عند فالثا وذلك للارتيابات الكبيرة في الشروط الأوّلية التي وضعها، إذ أنه لم يأخذ بالحسبان دوران الثقب حول ذاته، وهو ما يرفع اعتماده في المشاهد المستقبلية التي يخطط لإجرائها، لما قد يكون له من تأثير على شدة الركلات وعلى اتجاهها.

التقدم الذي أحرز:

تمكن مؤخراً فريق يضمّ كُلاًّ من لوك بلانشيه من معهد فيزياء الفلك في باريس، ومحمد كصلاح من معهد أبحاث رامان في بنغالور في الهند وكليفورد ويل من جامعة واشنطن، من إدخال تحسينات ملموسة على حدود الخطأ المرتكب في حساب سرعة الانحسار، إذ لم يعد هذا الخطأ يتعدى نسبة عشرين بالمئة، وهو ما يعني أن نتائجهم كانت الأكثر دقة حتى الآن. وبرغم تركيزهم في حساباتهم على مرحلة الغوص، فإن نتائجهم تتوافق ونتائج فريق هيوز وفالثا.

يستطيع علماء فيزياء الفضاء وضع برامج حاسوبيّة تسمح بحساب سرعات الركل في حالات خاصة كتلك التي ينطلق فيها سريعاً نحو الاصطدام ثقبان أسودان بكتلتين وعزمَي دوران ذاتي محددين. أمّا وضع برامج لحساب هذه السرعات في الحالة العامة التي تكون فيها كتلة الثقب وعزمه غيرَ محددين فأكثر صعوبة. وعلى الباحثين النظريّين حلّ معادلات حقل آنشتاين دون اللجوء إلى تقريبات لتكون برامجهم الحاسوبية طيّعة، سهلة القياد.

يقول هيوز إنه على ثقة بأن شخصاً ما في يوم ما سيكون قادراً على إجراء الحسابات كلّها، دون أن يكون قادراً على تحديد ذلك اليوم.

أما سول توكولسكي من جامعة كورنل فيقول إن سنوات خمساً مضت بالكاد على طرح موضوع ركلات الثقوب السوداء، ويأمل بإيجاد حلّ لها في السنوات الخمس القادمة. ويضيف قائلاً: «كان الناس يظنّون في مطلع التسعينيات أن بوسعنا، لو كنّا بارعين، أن نجد سريعاً حلاً لموضوع اندماج الثقوب السوداء، وإلاّ فعلينا أن ننتظر توفّر حواسيب أكثر قدرة واستطاعة لحلّ هذا الموضوع بقوّتها الغاشمة. ونعلم الآن أن هذا الموضوع لا يُحلّ بالقوة الغاشمة لوحدها، بل علينا أن نكون بارعين أيضاً، وهو ما لم نحقّقه تماماً حتى الآن!!



محتويـات الكتـاب

الباب الرابع:

النسبية وميكانيك الكم

الباب الخامس:
الطبيعـة والحيـاة

الباب السادس:
الفيزيـاء النوويـة

الباب السابع:

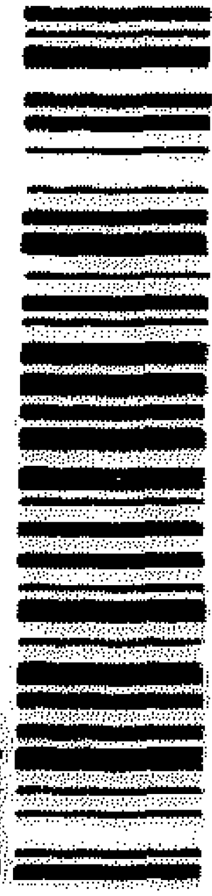
سير ذاتية

ملحق:



نبذة عن حياة العماد أول مصطفى طلاس

- ولد بمدينة «الرستن» في محافظة حمص في 1932.5.11 وتلقى علومه الابتدائية فيها، ودرس المرحلة الثانوية في مدرسة عبد الحميد الزهراوي ونال شهادة الدراسة الثانوية (القسم الأدبي) في العام 1951 (دراسة حرة).
- انتسب إلى أسرة التربية والتعليم بعد نيل شهادة الكفاءة وكان معلماً للرياضة وقائداً للفرقة الكشفية في مدرسة «القريّا» بمحافظة السويداء «جبل العرب».
- انتسب إلى الكلية العسكرية في 1952.11.1، وتخرج منها ملازماً بسلاح المدرعات في 1954.11.1.
- في خريف العام 1959 اختير ممثلاً للجيش السوري على أنه أفضل ضابط مثقف للمناظرة بين الجيشين (السوري والمصري).
- يُعدُّ واحداً من أبرز رواد الثقافة في الوطن العربي، ومن أوسعهم إطلاعاً وأغزرهم إنتاجاً.
- عضو اتحاد الكتاب العرب، ألّف ستة وأربعين كتاباً في شتى مجالات المعرفة وقد ترجم بعضها إلى أهم اللغات الحية في العالم.
- حاز على شهادة الدكتوراه في العلوم العسكرية من أكاديمية الأركان العامة (فورشيلوف) في العام (1980).
- في العام 1990 حاز على دكتوراه في العلوم التاريخية من معهد التاريخ العسكري في موسكو.
- يحمل 61 وساماً وميدالية سورية وعربية ودولية.
- وإدراكاً منه لأثر الكتاب، إلى جانب البندقية، أسس في العام 1983 «دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر».


Bibliotheca Alexandrina
05833790